

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta

Sanna Häsä

GENERAATTORISUOJAUKSEN UUSINTA

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin
tutkintoa varten Espoossa 14.12.2009

Työn valvoja

professori Matti Lehtonen

Työn ohjaaja

diplomi-insinööri Mikko Parkkonen

Tekijä: Sanna Häsä

Työn nimi: Generaattorisuojauksen uusinta

Päivämäärä: 14.12.2009

Kieli: Suomi

Sivumäärä: 66+17

Tiedekunta: Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta
Laitos: Sähkötekniikan laitos

Työn valvoja: professori Matti Lehtonen

Työn ohjaaja: diplomi-insinööri Mikko Parkkonen

Työn tarkoituksena oli löytää ratkaisu ja luoda suuntaviivoja generaattorin toisosuojaukselle ja sen uusinnalle. Pääosin tutkimuksen kohteena on blokkikytkentäinen turbogeneraattori ja siihen liittyvä nykyaikainen numeerinen suojaus.

Työssä käydään läpi tavallisimmat generaattorin suojaustoiminnot. Tässä yhteydessä tarkastellaan lähemmin sekä staattorin että roottorin maasulkusuojauksen eri toteutusvaihtoehtoja. Tämän lisäksi pohditaan uusinnan kriteerejä ja esitetään laskentaesimerkin avulla taloudellinen tarkastelu generaattorisuojauksen uusinnalle. Myös uusintaprojektin laajuutta, sen eri vaiheita ja aikataulutusta sivutaan.

Käytännön esimerkkinä on Helsingin Energian omistama Vuosaari A-kaasuturbiinivoimalaitos, jonka generaattoriblokkisuojauksen uusinta on tarkastelun kohteena. Työssä esitetään ehdotelma koko generaattoriblokin suojaus uusinnalle, jota varten on käyty läpi tarvittavat ja suositeltavat suojaustoiminnot sekä niihin tarvittavat suojarieleet ja lisälaitteet. Myös laitteiden sijoitukseen ja toimintojen kahdennuksiin otetaan kantaa.

Lisäksi esitetään ratkaisumalli nykyaikaisten numeeristen suojien kommunikointiin muiden järjestelmien, tässä lähinnä voimalaitosautomaation, kanssa. Lopuksi luodaan lyhyt katsaus valittujen ratkaisujen sovellettavuuteen myös muihin kohteisiin.

Avainsanat:

Generaattori, suojaus, suojarieleet, toisiojärjestelmät, uusinta

Author: Sanna Häsä

Name of the Thesis: Refurbishment of the Generator Protection

Date: 14.12.2009

Language: Finnish

Number of pages: 66+17

Faculty: Faculty of Electronics, Communications and Automation
Department: Department of Electrical Engineering

Supervisor: professor Matti Lehtonen

Instructor: MSc. Mikko Parkkonen

The aim of the work was to find a solution and set some guidelines for the relay protection and the protection refurbishment with the modern numerical protection systems of the block-connected non-salient pole generator.

First the general protection functions for the generators are introduced. Also different methods of realising stator ground fault protection are analysed and the practises of rotor earth fault protection are discussed. In addition the criteria, extent and scheduling of the protection refurbishment are considered. A calculation example to enlighten the economical effects of the generator faults and costs of the protection refurbishment is presented.

Case Vuosaari A gas-turbine –plant owned by Helsingin Energia is used as an example. The recommended protection functions for the entire gas-turbine generator block are proposed. Also some new as well as gas-turbine –specific protection functions are introduced. After that the amount of the protection equipment and their auxiliaries is considered and linked to that the arrangement of the equipment and the redundancies are discussed.

In the end a modern way to realise a fast and reliable communication with the other equipment, mainly power plant automation system, is illustrated. Also a short review for adaptation of the suggested solutions to the other generators is presented.

Keywords:

Generator, protection, protection relay, secondary systems, refurbishment

ESIPUHE

Tämä diplomityö on tehty Siemens Osakeyhtiön Energia-sektorin Power Distribution -divisioonassa opinnäytteeksi Teknillisen Korkeakoulun Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunnalle.

Haluan kiittää työn valvojaa professori Matti Lehtosta kärsivällisyydestä työn suhteen sekä aiheeseen saamastani tuesta. Suurkiitokset myös DI Mikko Parkkoselle työn ohjauksesta, tärkeiden kysymysten esittämisestä ja hyvistä havainnoista sekä Jukka Tuukkaselle ajankohtaisen ja mielenkiintoisen diplomityöaiheen järjestämisestä.

Erityiskiitokset Tapio Naakalle opastamisesta ja kärsivällisestä vastaamisesta lukuisiin kysymyksiin työn aikana sekä Helsingin Energian ja Vuosaaren voimalaitoksen henkilökunnalle kaikesta avusta. Kiitokset myös kaikille muille työn etenemiseen myötävaikuttaneille sekä ystävälleni Aulille kielenhuollosta.

Viimeisenä haluan kiittää aviomiestäni, joka sai kärsiä opiskelustani vuosikausia ja stressasi diplomityöni tekemisestä enemmän kuin minä itse.

Espoo, 14.12.2009

Sanna Häsä

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	ii
ESIPUHE	iv
SISÄLLYSLUETTELO	v
KUVALUETTELO	viii
SYMBOLIT JA LYHENTEET	ix
1 JOHDANTO	2
2 YLEISTÄ	3
2.1 Generaattori	3
2.2 Generaattorin magnetointilaitteet	5
2.3 Tahdistuslaitteet	6
2.4 Mittamuuntajat	8
2.4.1 Jännitemuuntaja	8
2.4.2 Virtamuuntaja	8
2.5 Suojareleet	9
2.5.1 Sähkömekaaniset suojareleet	10
2.5.2 Staattiset suojareleet	10
2.5.3 Numeeriset suojat	11
3 GENERAATTORIN SUOJAUS	13
3.1 Generaattorin viat	13
3.2 Suojauksen kahdennus	15
3.3. Laukaisumatriisi	15
3.4 Generaattorin tähtipisteen maadoitustavat	17
3.4.1 Suuri- tai matalaohmisesti resistanssin kautta maadoitettu generaattori	17
3.4.2 Jakelumuuntajan kautta maadoitettu (rinnakkaisresistanssi tai –induktanssi)	18
3.4.3 Induktanssin kautta maadoitettu generaattori	18
3.4.4 Tehollisesti eli suoraan maadoitettu	19
3.5 Generaattorin suojaustoiminnot	20
3.5.1 Erovirtasuojaus	21
3.5.2 Impedanssisuojaus	23
3.5.3 Vakioaikaylivirtasuojaus	24
3.5.4 Staattorin ylikuormitussuojaus	25
3.5.5 Kierrossulkusuojaus	25
3.5.6 Takatehosuojaus	26
3.5.7 Staattorin 90% maasulkusuojaus	27
3.5.8 Staattorin 100% maasulkusuojaus	28
3.5.9 Roottorin maasulkusuojaus	29
3.5.10 Vinokuormitussuojaus	30
3.5.11 Roottorin ylikuormitussuojaus	31
3.5.12 Ylijännitesuojaus	31
3.5.13 Alijännitesuojaus	31
3.5.14 Alimagnetointisuojaus	31
3.5.15 Ylimagnetointisuojaus	32
3.5.16 Yli- ja alitaajuussuojaus	32
3.6 Järjestelmän stabiilisuus	32

3.7 Epätahtisuojaus	34
4 GENERAATTORISUOJAUKSEN UUSINTA	37
4.1 Perustelut ja reunaehdot generaattorin toisiosuojauksen uusinnalle	37
4.2 Uusittavan suojauksen kriteerit	37
4.3 Uusinnan aikataulutus voimalaitoksen elinkaarella	39
4.4 Uusinnan laajuuden määrittely	39
4.4.1 Mittamuuntajat	40
4.4.2 Komponentti	40
4.4.3 Suojauskaappi	40
4.4.4 Kaapelit	41
4.4.5 Koko suojausjärjestelmä	41
5 LIITYNNÄT MUIHIN JÄRJESTELMIIN	42
5.1 Liitynnät muihin järjestelmiin	42
5.2 Uusinnassa mietittävää liikennöinnin kannalta	42
5.3 Numeeristen suojien kommunikointimahdollisuudet	43
5.3.1 IEC-60870-5-103	43
5.3.2 IEC 61850	44
5.3.3 Profibus-DP	44
5.3.4 DNP3.0	44
5.3.5 Modbus	44
5.4 Yhteenveto kommunikointiväylistä	45
6 TALOUDELLINEN TARKASTELU	46
6.1 Suojauksen merkitys	46
6.2 Suojauksen uusimisen kustannukset	47
6.3 Pörssistä ostetun sähkön kustannukset	48
7 VUOSAARI A-VOIMALAITOKSEN GENERAATTORI-SUOJAUSUUSINTA ...	49
7.1 Yleistä	49
7.1.1 Vuosaaren voimalaitos	49
7.1.2 Selvityksen lähtötilanne	49
7.1.3 Suojaustarkastelu	50
7.2 Mittamuuntajat	51
7.3 Generaattorisuojaus	51
7.4 Uuden generaattorisuojauksen toiminnot	52
7.4.1 Muutokset verrattuna vanhaan suojaukseen	52
7.4.2 Lisäykset verrattuna vanhaan suojaukseen	53
7.4.3 Täysin uudet suojaustoiminnot	53
7.5 Pää- eli blokkimuuntajan ja omakäyttömuuntajan suojaus	54
7.6 Muuntajasuojauksen vaihtoehtojen vertailu	56
7.7 Laukaisut	56
7.8 Suojauslaitteet ja niiden sijoitus	58
7.9 Suojareleiden kommunikointi	58
7.10 Valittujen ratkaisujen sovellettavuus	59
8 YHTEENVETO	61
VIITTEET	63
LIITE A Staattorin 100% maasulkusuojaus (3. yliaalto)	67
LIITE B Staattorin 100% maasulkusuojaus (20Hz)	68
LIITE C Roottorin maasulkusuojaus (fn, R-mittaus)	70

LIITE D Roottorin maasulkusuojaus 1...3Hz	71
LIITE E Uusintaprojektin toteutusvaiheet, tarkistuslista.....	73
LIITE F Lämpötilatilasto tammikuu 2009	74
LIITE G Vuosaaren A- voimalaitoksen pääkaavio.....	75
LIITE H Vuosaaren A1- generaattorin suojauskaavio	76
LIITE I Vuosaareen valitut suojaustoiminnot	77
LIITE J Valitut laitteet ja niiden sijoitus	78
LIITE K Uusien suojaustoimintojen kuvaus	79

KUVALUETTELO

Kuva 1 Suomen sähköntuotantojakauma vuonna 2008 [1]	2
Kuva 2 Generaattorityypit	3
Kuva 3 Generaattorin kytkentätavat	4
Kuva 4 Harjallinen magnetointi [5]	5
Kuva 5 Harjaton magnetointi [5]	6
Kuva 6 Tahdistinlaitteita	7
Kuva 7 Keskiännitetaso mittamuuntajia	9
Kuva 8 Suojareletyyppejä	11
Kuva 9 Numeerinen monitoimisuoja [12]	12
Kuva 10 Suojauksen kahdennustapoja	15
Kuva 11 Laukaisumatriisin periaate [15]	16
Kuva 12 Laukaisumatriisi [16]	16
Kuva 13 Resistanssimaadoitettu tähtipiste	17
Kuva 14 Jakelumuuntajamaadoitettu tähtipiste	18
Kuva 15 Muita tähtipisteen maadoitustapoja	19
Kuva 16 Kaksipisteisen erovirtasuojauksen peruseriaate [18]	21
Kuva 17 Pitkittäiserovirtasuojan virtojen suunnat [18]	22
Kuva 18 Impedanssisuojauksen periaate [18]	23
Kuva 19 Impedanssisuojan laukaisukoordinaatisto [18]	23
Kuva 20 Impedanssisuojan asetteluvyöhykkeet –esimerkki [18]	24
Kuva 21 Kierrossulkusuojauksen mittauskenttä [18]	26
Kuva 22 Staattorin maasulku [5]	27
Kuva 23 Nollajännitteen esiintyminen generaattorin tähtipisteessä [5]	28
Kuva 24 Maasulku roottorissa [5]	29
Kuva 25 Vinokuormitusuojan laukaisukäyrä [18]	30
Kuva 26 Voimalaitoksen tehontuotannolle asetetut vaatimukset [19]	33
Kuva 27 Vian aiheuttama verkkojännitteen vaihtelu [19]	33
Kuva 28 Tehonheilahtelun ekvivalenttimalli [18]	34
Kuva 29 Impedanssisuora mittauspisteessä m [18]	35
Kuva 30 Monikulmioinen epätahtikoordinaatisto [18]	35
Kuva 31 Esimerkki IEC 60870-5-103 relevälytoteutuksesta	45
Kuva 32 Generaattorisuojauksen periaate	51
Kuva 33 Muuntajien suojaus, vaihtoehto 1	54
Kuva 34 Muuntajien suojaus, vaihtoehto 2	55
Kuva 35 Muuntajien suojaus, vaihtoehto 3	55
Kuva 36 Laukaisujen toteutusperiaate	57
Kuva 37 Liityntä automaatioon IEC 61850 relevälyän ja IEC 60870-5-104 -protokollan avulla	59

SYMBOLIT JA LYHENTEET

Symbolit:

U	jännite
I	virta
X	reaktanssi
R	resistanssi
Z	impedanssi
P	pätöteho
Q	loisteho
R_E	maaresistanssi
C_E	maakapasitanssi
Z_E	maaimpedanssi/
I_E	maasulkuvirta
U_0	nollajännite
U_E	nollajännite
I_0	nollavirta
U_R	resistanssin yli mitattu jännite
I_2	vastajärjestelmän virta
I_{ses}	staattorin maasulkuvirta toisiopuolelta mitattuna
U_{ses}	virran I_{ses} aiheuttama varausjännite

Lyhenteet:

A	ampeeri
V	voltti
Hz	hertsi
kV	kilovoltti
MVA	megavoltiampeeri
MW	megawatti
PC	personal computer, tietokone
rms-arvo	neliöllinen keskiarvo

Suojaukseen liittyviä ANSI-koodeja:

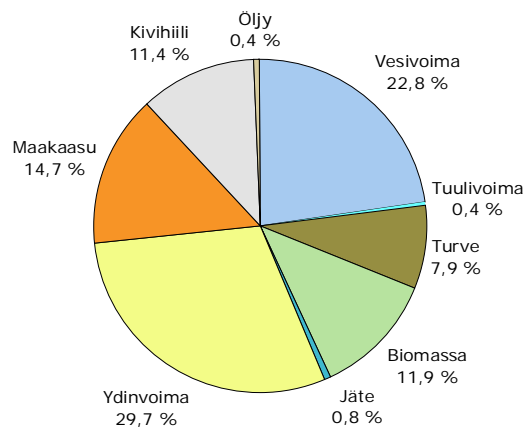
IEC 60617 ja ANSI/IEEE C 37.2-1991 -standardien mukaisia relesuojaukseen liittyviä kojenumeroita

2	Aikarele
12	Laite, joka toimii koneen pyörimisnopeuden ylittäessä asetellun arvon
14	Laite, joka toimii koneen pyörimisnopeuden alittaessa asetellun arvon
21	Impedanssi/Distanssirele
24	Ylimagnetointi
25	Synkronointi- ja jännitetarkistusrele
26	Laite, joka toimii lämpötilan ylittäessä tai alittaessa asetellun rajan
27	Alijänniterele
32	Tehonsuuntarele
37	Alivirta- tai alitehorele
40	Koneen alimagnetointisuoja
46	Virtoihin perustuva vaihejärjestys- tai epäsymmetriasuoja
47	Jännitteiden myötä- tai vastakomponenttia tai vaihejärjestystä mittava suojarele
48	Rele, joka toimii, jos laitteen normaali käynnistys, käyttö tai pysäytys ei onnistu
49	Lämpörele/ylikuormitus
49R	Roottorin ylikuormitusrele (lämpösuoja)
50	Ylivirtasuoja, pikalaukaisu
50BF	Katkaisijavikasuoja
50N	Nollavirtaa mittaava ylivirtasuoja, pikalaukaisu
51	Tavallinen ylivirtasuoja, vakioaika- tai käänteisaikatoiminta
51G	Tavallinen ylivirtasuoja maasulkupiirille, vakioaika- tai käänteisaikatoiminta
51N	Tavallinen nollavirtaa mittaava ylivirtasuoja, vakioaika- tai käänteisaikatoiminta
51P	Tavallinen vaihevirtaa mittaava ylivirtasuoja, vakioaika- tai käänteisaikatoiminta
52	Vaihtovirtakatkaisija
54	Nopea tasavirtakatkaisija
55	Vaihtovirtapiirin tehokertoimen ylitys- tai alitusrele
59	Ylijänniterele
59N	Nollajänniterele
60	Tasapainorele, joka toimii kahden jännitteen tai kahden virran erotusarvosta
64G	Staattorin maasulku
64R	Roottorin maasulku
67	Suunnattu ylivirtarele
67G	Suunnattu staattorin maasulku
67N	Suunnattu maasulkurele
68	Lukitusrele, joka estää toisen releen laukaisun

78	Vaihekulma- tai tahdistaputoamisrele, (kahden jännitteen, kahden virran tai jännitteen ja virran välinen vaihekulma)
79	Jälleenkytkentärele
81	Taajuusrele, taajuuspoikkeama tai taajuuden muutosnopeus
81R	Roottorin taajuuden muutosnopeussuojaus
87	Erovirtarele
87M	Moottorin differentiaalisuoja (erovirtarele)
87N	Nollavirtaa mittaava erovirtarele
87G	Generaattoridifferentiaali (erovirtarele)
87T	Muuntajadifferentiaali (erovirtarele)
91	Suunnattu jänniterele
92	Suunnattu jännite-ja tehorele

1 JOHDANTO

Suomessa sekä ydinvoimalaitokset että pääsääntöisesti kaikki polttovoimalaitokset kaasu- ja öljylaitoksia lukuun ottamatta ovat höyryturbiinilaitoksia. Sekä höyryturbiinien että kaasuturbiinien kanssa käytetty generaattorityyppi on umpinapageneraattori. Näin ollen alla olevasta kuvasta 1 voidaan todeta, että suurin osa Suomen kokonaistehosta lasketusta sähköntuotannosta tapahtuu voimalaitoksissa, joissa käytetään umpinapageneraattoreita.



Kuva 1 Suomen sähköntuotantojakauma vuonna 2008 [1]

Koska generaattori on sähköntuotannon kannalta tärkeä ja kallis komponentti, halutaan sen toimintavarmuus taata suojaamalla se erilaisia häiriöitä vastaan. Generaattoria voidaan suojata monella eri tavalla. Tyypillisiä ovat suojaus ylikuumenemista vastaan jäähdytyksellä, värähtelyn mittaaminen mekaanisten vaurioiden havaitsemiseksi sekä erilaiset sähköiset suojaukset, joista käytetään yleisesti nimeä relesuojaus tai toisiosuojaus. Tässä työssä termillä ”suojaus” tarkoitetaan nimenomaan relesuojausta.

Yleisesti ottaen höyryturbiinivoimalaitoksen elinikänä voidaan pitää noin 60 vuotta. Usein mekaanisten laitteiden elinikä on pitempi kuin sähkö- tai automaatiolaitteiden, tosin niiden huollon tarve on vastaavasti suurempi. Toisiojärjestelmien kuten relesuojauksen eliniäksi arvioidaan noin 20 vuotta, jolloin ne uusitaan voimalaitoksen elinaikana vähintään kaksi kertaa. Uusintatarve voi riippua monista seikoista. Suurin osa näistä johtuu laitteiston ikääntymisestä.

Tässä työssä on tarkoituksena perehtyä generaattorin toisiosuojaukseen ja sen uusintaan. Pääosin tarkastellaan blokkikytkentäistä umpinapageneraattoria ja siihen liittyvää nykyaikaista suojausta. Työssä esitetään ehdotelma koko generaattoriblokin suojausuusinnalle mukaan lukien pää- eli blokkimuuntajan suojaus, jota varten on käyty

läpi tarvittavat ja suositeltavat suojaustoiminnot sekä niihin tarvittavat suojareleet ja lisälaitteet. Myös laitteiden sijoitukseen ja toimintojen kahdennuksiin otetaan kantaa.

Käytännön esimerkkinä on Helsingin Energian omistama Vuosaari A-kaasuturbiinivoimalaitos, jonka generaattoriblokkisuojauksen uusinta on tarkastelun kohteena.

Työn alkupuolella, luvussa 2, luodaan lyhyt katsaus generaattoriin, sen kytkentään ja siihen liittyviin toisiojärjestelmiin kuten mittamuuntajiin, tahdistinlaitteisiin ja magnetointiin. Suojareleet ja niiden historia esitellään lyhyesti.

Generaattorin vikatyyppejä ja suojausperiaatteita tarkastellaan luvussa 3, samoin generaattorin tähtipisteen maadoitustapoja. Myös laukaisumatriisi esitellään. Yleisesti käytettyihin suojaustoimintoihin perehdytään tarkemmin ja tässä yhteydessä tutustutaan lähemmin sekä staattorin että roottorin maasulkusuojauksen eri toteutusvaihtoehtoihin. Lisäksi sivutaan kantaverkkoyhtiön generaattoreille määrittämiä suorituskykyvaatimuksia ja stabiilisuusrajoja sekä niiden vaikutusta suojaukseen.

Sen jälkeen luvussa 4 käydään läpi perusteluja ja taloudellista tarkastelua generaattorisuojauksen uusinnalle sekä uusintaprojektin laajuutta, sen eri vaiheita ja aikataulutusta.

Luvussa 5 esitellään suojareleiden eri kommunikointivaihtoehdot muiden järjestelmien kanssa. ja luvussa 6 esitetään laskelma suojaus uusinnan kustannuksista verrattuna ilman suojausta aiheutuneesta viasta johtuvan vahingon ja tuotantokeskeytyksen kustannuksiin.

Luvussa 7 syvennyttään Vuosaari A- kaasuturbiinivoimalaitoksen generaattorisuojaukseen ja sen uusinnan tarkasteluun. Tässä yhteydessä käydään läpi kaikki kyseiselle generaattorille suositeltavat suojaustoiminnot tarvittavine laitteineen sekä kolme eri suojausvaihtoehtoa pää- eli blokkimuuntajalle ja omakäyttömuuntajalle.

Lisäksi esitetään ratkaisumalli nykyaikaisten numeeristen suojien kommunikointiin muiden järjestelmien, tässä lähinnä voimalaitosautomaation, kanssa. Lopuksi luodaan lyhyt katsaus valittujen ratkaisujen sovellettavuuteen myös muihin kohteisiin.

2 YLEISTÄ

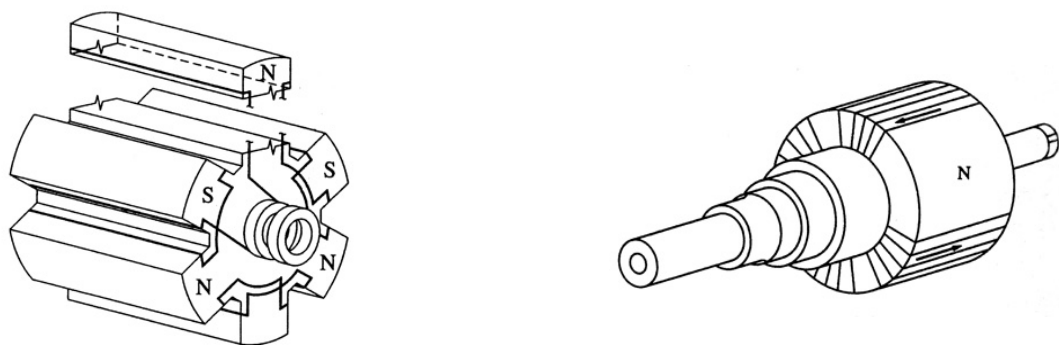
2.1 Generaattori

Generaattori on pyörivä sähkökone, jonka tehtävänä on mekaanisen energian muuttaminen sähköiseksi energiaksi. Generaattoreita on olemassa useaa eri tyyppiä, mutta yleisimmin generaattoreina käytetään etenkin suurilla tehoilla tahtigeneraattoreita. Muut generaattorityypit jätetään tämän työn tarkastelun ulkopuolelle.

Tahtigeneraattoria pyöritetään yleensä turbiinin avulla, joka voi saada käyttövoimansa useista eri lähteistä. Yleisimpiä turbiineja ovat höyryturbiini, vesiturbiini ja kaasuturbiini. Suurissa voimalaitoksissa käytettäviä tahtigeneraattoreita on kahta eri päätyyppiä, avonapageneraattori ja umpinapageneraattori.

Varsi- eli avonapageneraattorin rakenne on nimensä mukaisesti avoin ja sen halkaisija on suuri (esim. 200 MVA koneella 14 m), eikä se tämän vuoksi mekaanisesti kestä suuria nopeuksia. Avonapageneraattoreita käytetään tyypillisesti vesivoimalaitoksissa, joissa nopeudet ovat pieniä. Nopeusrajana avonapageneraattorille voidaan yleisesti pitää kehänopeutta 80 m/s, joka akselin halkaisijan ollessa 14 m vastaa pyörimisnopeutta 90 kierrosta minuutissa. [2][3]

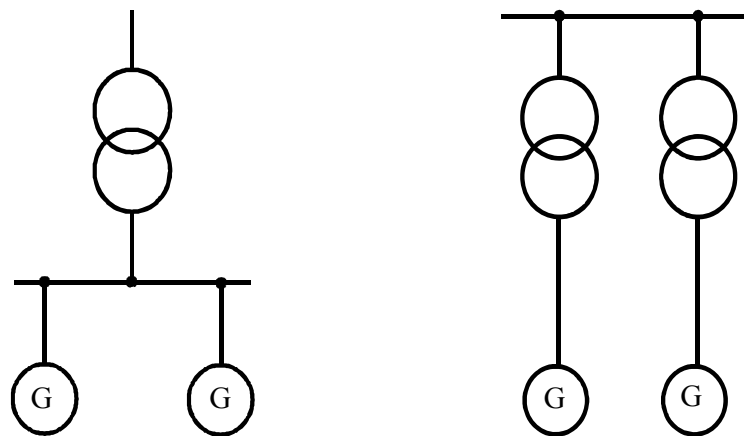
Umpinapageneraattori on rakenteeltaan sylinterimäinen ja sen halkaisija on pieni (esim. 200 MVA koneella 1,2m). Tämä mekaaninen rakenne kestää paremmin suurempia nopeuksia kuin avonapageneraattori, jonka vuoksi sitä käytetään tyypillisesti höyry- ja kaasuturbiinilaitoksissa, joissa nopeudet ovat suuria, 1500...3000 kierrosta minuutissa. Tällaista umpinapageneraattoria kutsutaan usein myös turbogeneraattoriksi. [2][3]



Kuva 2 Generaattorityypit
Avonapageneraattori vasemmalla, turbogeneraattori oikealla [4]

Generaattorit voidaan kytkeä verkkoon joko suoraan kiskokytkenäisinä tai muuntajan kautta blokkikytkenäisinä. Kiskokytkenässä useampi generaattori kytketään suoraan samaan kiskoon ja päämuuntaja, jolla jännite nostetaan syötettävän verkon tasolle, on yhteinen kaikille generaattoreille. Tyypillinen sovellus kiskokytkenälle ovat suuret vesivoimalaitokset.

Blokkikytkenässä jokainen generaattori on kytketty verkkoon oman pää- eli blokkimuuntajansa kautta. Suomessa umpinapageneraattoreilla yleisesti käytetty tapa on blokkikytkenä.



Kuva 3 Generaattorin kytkentätavat
Generaattorien kiskokytkenä vasemmalla, generaattorin blokkikytkenä oikealla [5]

Generaattorin toisilaitteisiin kuuluvat magnetointilaitteisto, tahdistuslaitteet, mittamuuntajat ja suojareleet. Näitä käsitellään tarkemmin seuraavissa kappaleissa. Muita generaattorin ohjaukseen ja säätöön liittyviä laitteita ovat generaattorikatkaisija, turbiinin säätölaitteet sekä erilaiset automaatiojärjestelmät, joita voi suurella laitoksella olla useampikin.

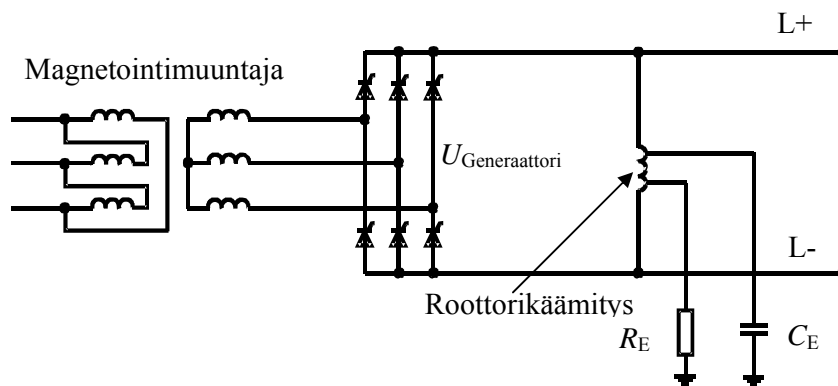
Tahtigeneraattorin pätötehon säätö tapahtuu voimakoneen eli tässä tapauksessa turbiinin vääntömomenttia muuttamalla, kun taas induktiivisen ja kapasitiivisen loistehon säätö tapahtuu magnetointia muuttamalla [3]. Seuraavaksi tarkastellaan kahta erilaista tapaa toteuttaa tahtigeneraattorin magnetointi.

2.2 Generaattorin magnetointilaitteet

Magnetointia tarvitaan, jotta generaattori saadaan tuottamaan jännitettä. Magnetoinnissa roottorikäämitykselle tuodaan tasavirta, joka synnyttää generaattorin ilmväliin magneettikentän, joka taas puolestaan indusoi staattorikäämitykseen jännitteen. Magnetointi voidaan toteuttaa kahdella eri tavalla, harjallisena tai harjattomana magnetointina.

Harjallisessa magnetoinnissa magnetointivirta viedään roottorille hiiliharjojen kautta. Magnetointijännite voidaan ottaa joko ulkoisesta lähteestä, esimerkiksi laitoksen omakäyttöverkosta magnetointimuuntajan avulla tai roottorin kanssa samalla akselilla pyörivältä magnetointigeneraattorilta herätinkoneen ja hiiliharjojen kautta. [4]

Harjallinen magnetointi vaatii säännöllistä huoltoa, koska hiiliharjat ovat kuluvia osia ja niitä pitää tarkastaa ja vaihtaa säännöllisesti jotta varmistetaan magnetoinnin luotettava toiminta.



Kuva 4 Harjallinen magnetointi [5]

Harjattomassa magnetoinnissa on kolme pääosaa: tasasuuntaaja, magnetointikone ja diodisilta. Lisäksi voidaan käyttää herätinkonetta syöttämään jännitettä tasasuuntaajalle.

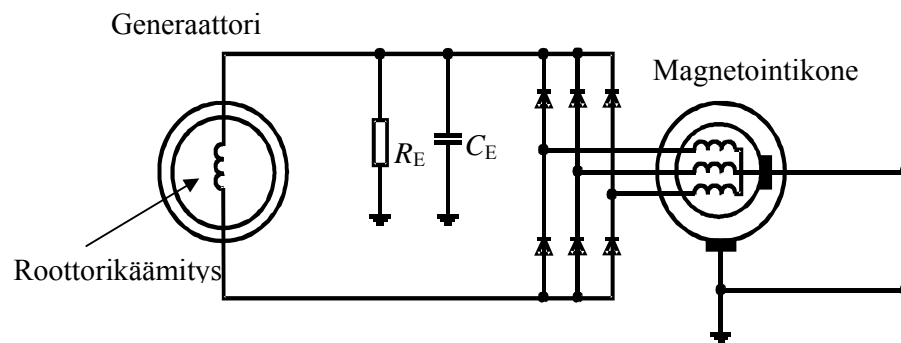
Päägeneraattorin roottorin kanssa samalle akselille on kiinnitetty akselin mukana pyörivä diodisilta, joka tasasuuntaa magnetointivirran ja josta se johdetaan roottorin käämeihin. Tämä magnetointivirta tuodaan diodisillalle samalla akselilla pyörivän magnetointikoneen avulla.

Magnetointikoneen roottori sijaitsee sen rungossa. Roottorille tuodaan tasavirta tasasuuntaajalta jännitteensäätäjän ja magnetointikatkaisijan kautta. Tämä roottorille tuotu tasavirta indusoi akselilla pyörivälle staattorille vaihtojännitteen. [4]

Tasasuuntaajalle tuotava jännite voidaan ottaa joko ulkoisesta jännitelähteestä tai samalla päägeneraattorin akselilla sijaitsevalta herätinkoneelta.

Herätinkone on pieni kestopagetoitu vaihtosähkögneraattori. Sen roottorilla sijaitsevat kestopagneetit indusoivat staattoriin vaihtojännitteen, kun akseli jolla roottori sijaitsee, alkaa pyöriä. Tämä vaihtojännite tuodaan staattorista tasasuuntaajalle ja siitä edelleen magnetointikoneelle edellä kuvatulla tavalla.

Koska harjattomassa magnetoinnissa magnetointijännite tuodaan generaattorille ilman erillisiä hiiliharjoja tai muutakaan mekaanista kosketuspintaa, ei järjestelmässä ole sellaisia kuluvia osia kuin harjallisessa magnetoinnissa eikä se näin ollen tarvitse niin paljon huoltoa.



Kuva 5 Harjaton magnetointi [5]

2.3 Tahdistuslaitteet

Generaattorin toisiojärjestelmiin kuuluu magnetoinnin, suojausten ja mittausten lisäksi myös tahdistuslaitteisto. Generaattorin tahdistuksen verkkoon tulee tapahtua oikea-aikaisesti ja tarkasti, jotta voidaan välttää sekä häiriöt verkon puolella (jännite- ja virtapiikit) että generaattorin vaurioituminen.

Tahdistuksen periaatteena on, että tahdistettavan generaattorin jännite ja taajuus ovat samat kuin syötettävän verkon. Myös jännitteiden välisen kulman tulee olla riittävän pieni, jotta tahdistus onnistuu. Generaattorin pyörimisnopeutta säädetään turbiinin avulla verkon taajuutta vastaavaksi ja magnetointia säädetään samaan aikaan siten, että generaattorin jännite on yhtä suuri kuin verkon jännite. Kun saavutetaan tahdistettavan verkon kanssa yhtä suuret arvot, ohjataan generaattorikatkaisija kiinni ja verkkoon kytkeytyminen on tapahtunut.[3]

Joskus saatetaan puhua tahdistuksesta myös silloin kun ohjattavana katkaisijana on siirtoverkon jakorajat yhdistävä katkaisija ja molemmat verkot ovat galvaanisesti kytkettyinä toisiinsa jossakin etäisemmässä pisteessä. Tällöin kytkettävien osien

taajuusero on yleensä pieni. Kyseessä ei tällöin kuitenkaan ole varsinaisesti tahdistuksesta, koska yhdistettävien verkon osien jännitettä ja taajuutta ei voida yksiselitteisesti säätää, mikäli niiden arvot poikkeavat merkittävästi toisistaan.

Generaattorin tahdistus suoritetaan normaalisti generaattorikatkaisijalla tai sen puuttuessa blokkimuuntajan jälkeen sijaitsevalla verkkokatkaisijalla. Jos kyseessä on suoraan kiskoon kytketty generaattori, jonka tahdistavana katkaisijana käytetään nostomuuntajan yläjännitepuolen verkkokatkaisijaa, saattaa muuntajan väliottokytken asettelu olla tarpeellista halutun jännitetason saavuttamiseksi.

Tahdistuslaitteistoon kuuluu tahdistin, tahdistuksen valvoja, pyörimisnopeuden eli taajuuden ja magnetoinnin eli jännitteen säätö. Nykyään numeeriset laitteet mahdollistavat sen, että tahdistin ja tahdistuksen valvoja voivat olla myös samassa laitteessa.



Kuva 6 Tahdistinlaitteita

Vasemmalla vanha automaattitahdistin, keskellä synkronoskooppi käsintahdistusta varten ja oikealla numeerinen tahdistin [5] (valokuvat Tapio Naakka, Siemens Osakeyhtiö)

2.4 Mittamuuntajat

Mittamuuntajat ovat nimensä mukaisesti muuntajia. Niillä muunnetaan ensiöpiirin jännitteet ja virrat toisiolaitteille, kuten mittareille ja suojaareleille sopiviksi. Mittamuuntajia voidaan toteuttaa eri periaatteilla, mutta yleisimmin käytettyjä ovat perinteiset induktiiviset muuntajat. Kuva erilaisista mittamuuntajista on esitetty sivulla 9.

2.4.1 Jännitemuuntaja

Jännitemuuntajat ovat yksivaiheisia ja ne on tyypillisesti kytketty tähteen, josta mitataan vaihejännitteet laskutusmittausta ja suojausta varten, sekä avokolmiokäämitys, jonka avulla määritetään maasulkujännite. Jännitemuuntajien toisiojännite on Suomessa yleensä $100/\sqrt{3}\text{V}$, kun ensiö on kytketty vaiheen ja maan väliin ja avokolmioon kytkettävien toisiokäämien nimellisjännitteenä on $100/3\text{V}$. [6]

Mittaus asettaa suojausta suurempia vaatimuksia jännitemuuntajan tarkkuudelle. Mittausjännitemuuntajan tarkkuuden täytyy säilyä nimellistaajuudella ensiöjännitteen vaihdellessa 80...100 % nimellisjännitteestä. Suojausjännitemuuntajan tarkkuuden säilymiselle on vastaavasti asetettu vaatimusalue, joka on 2...190 % nimellisjännitteestä verkon maadoitustavan määrittämästä nimellisjännitekertoimesta riippuen. [6]

Jännitemuuntajia on kahta eri tyyppiä, induktiivisia ja kapasitiivisia jännitemuuntajia. Näistä induktiiviset jännitemuuntajat ovat yleisempiä.

Induktiiviset jännitemuuntajat on käytännössä yleensä tehty niin, että niissä on ainoastaan yksi rautasydän, joka palvelee sekä mittaus- että suojaustarkoitusta. Toision avokolmiokäämi palvelee vain maasulkusuojausta, muuten yhteisellä rautasydämellä on useimmiten toisiossa yhteinen mittaus- ja suojauskäämi, joka täyttää sekä mittaus- että suojausvaatimukset. Ensiökäämitys on yhteinen.

Kapasitiiviset jännitemuuntajat mittaavat oikein vain nimellistaajuudella. Niitä ei siis voi käyttää lainkaan yliaaltojen mittaamiseen. Lisäksi niiden reagoinnissa ensiöjännitteen muutoksiin esiintyy viivettä. Myös kondensaattorin kapasitanssin lämpötilariippuvuus saattaa aiheuttaa ongelmia tarkkuuden suhteen. [6]

2.4.2 Virtamuuntaja

Virtamuuntajissa on yleensä useampia eri toisiokäämityksiä eli sydämiä. Käämityksille on asetettu erilaisia vaatimuksia käyttötarkoituksesta riippuen. Mittaussydämiä, joiden tarkkuusvaatimus on suurempi, käytetään tyypillisesti laskutusmittauksiin. Suojaussydämien tarkkuus on huonompi kuin mittaussydämien, mutta ne eivät kyllästy niin helposti vikavirtatilanteessa ja siitä syystä sopivat suojauksen vaatimuksiin. Tyypillisimmät virtamuuntajien toision nimellisvirrat ovat 1A ja 5A.

Virtamuuntajat voivat olla varustettuja kapasitiivisilla ulosotoilla jännitteenilmaisua varten. Tätä menetelmää jännitteen havaitsemiseen käytetään esim. täysin suljetuissa kojeistoissa, joissa ei voida jännitteettömyyttä todeta kiskosta mittaamalla. Kapasitiivisen ulosoton ominaisuudet ovat samankaltaiset kuin kapasitiivisen jännitemuuntajan. Lisäksi sen kuormitettavuus on pieni. Näiden seikkojen vuoksi sitä ei voida käyttää varsinaiseen mittaukseen tai suojaukseen.

Sähkömekaanisia ja staattisia suojareleitä käytettäessä on tiettyihin kohteisiin kuten erovirtasuojaukseen, tarvittu välivirtamuuntajia, koska varsinaisten virtamuuntajien muuntosuhteet ja kytkentäryhmä esimerkiksi muuntajan molemmin puolin eivät ole samat ja jotta suojattavan kohteen molempien puolien virrat on saatu tuotua samanvertaisina suojareleelle. Nykyisissä numeerisissa suojissa ei ulkopuolista sovitusta tarvita, koska virtamuuntajien tiedot, lähinnä muuntosuhteet, asetellaan laitteisiin ohjelmallisesti.

Virtamuuntajien tärkein ominaisuus suojauksen kannalta on sen kyky toistaa virtoja oikosulkutilanteessa. Virtamuuntaja ei saisi kyllästyä suurillakaan hetkellisillä virta-arvoilla. Tämän vuoksi virtamuuntajan valinta ja mitoitus suojaustarkoituksiin on tehtävä huolellisesti. Eri suojarelevalmistajat ovat asettaneet omat kriteerinsä oman suojauksensa kanssa käytettäville virtamuuntajille. [6]



Kuva 7 Keskijännitetason mittamuuntajia.

Jännitemuuntaja vasemmalla, virtamuuntaja keskellä ja läpivientivirtamuuntaja oikealla [7]

2.5 Suojareleet

Suojareleiden tarkoituksena on suojata sähköverkon laitteita vaurioitumiselta erilaisissa vikatilanteissa. Kaikki suojareleet on alun perin liitetty sähköverkon ensiöpuolelle, mutta nykyään virran ja jännitteen mittaukseen perustuvat suojareleet liitetään toisiopiireihin. Ensiöpiireissä käytetään vielä tyypillisesti lämpötilaan, paineeseen tai muihin ei-sähköisiin suureisiin perustuvia suojia. Suojareleitä on käytössä kolmea eri sukupolvea, sähkömekaanisia, staattisia ja numeerisia suojia.

2.5.1 Sähkömekaaniset suojareleet

Ensimmäiset toisiopuolelle liitettävät suojareleet ovat olleet sähkömekaanisia laitteita, joiden toimintaperiaate on perustunut erilaisiin jousiin, vipuihin ja muihin mekaanisiin komponentteihin. Niistä on hyvällä syyllä voitu käyttää nimitystä suojarele, koska niissä on selkeästi sähköisenä komponenttina ollut kela, aivan kuten muissakin releissä.

Jokainen suojaustoiminto on vaatinut oman suojareleensä. Lisäksi on tarvittu erilaisia piirien vakavointi- ja mittauslaitteita sekä aika- ja apureleitä. Toteutus on vaatinut paljon tilaa sekä monimutkaisen johdotuksen laitteilta toisille. Laitteet ovat olleet suuria ja painavia, koska ne on valmistettu kokonaan erilaisista metalleista ja ne on asennettu tyypillisesti metallista valmistettuun tukevaan reletelineeseen. [8]

Releen asettelut on tehty mekaanisesti jousia virittämällä ja kytkimiä säätämällä erilaisten työkalujen avulla. Sähkömekaaniset suojareleet vaativat säännöllistä huoltoa ja kunnossapitoa mekaanisten osien jumittumisen ja jousien kuoleentumisen vuoksi. Erityisesti vanhojen sähkömekaanisten releiden ongelmana on eristeaineen vanheneminen [9].

Laitteiden asiantuntijat alkavat olla harvassa, joka vaikeuttaa niiden huoltoa ja kunnossapitoa. Varaosina voidaan käyttää jo käytöstä poistettuja laitteita tai komponentteja voi yrittää korjauttaa hienomekaanikoilla, esimerkiksi kellosepillä. [10]

Vanhoja sähkömekaanisia suojareleitä on Suomessa vielä jonkin verran käytössä, mutta erilaisten uusintatöiden yhteydessä niitä ollaan vaihtamassa uudempiin numeerisiin suojiin. Kuva sähkömekaanisesta releestä on esitetty sivulla 11.

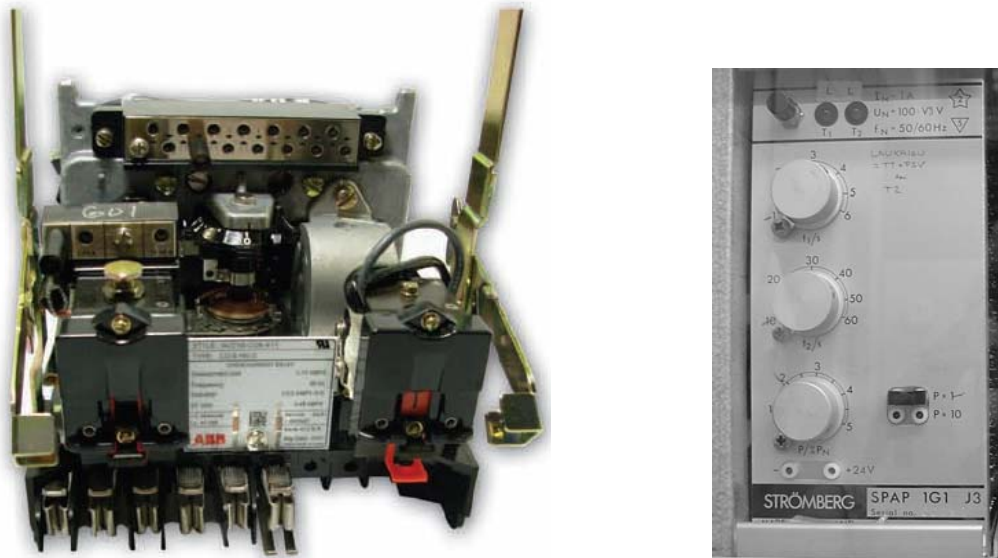
2.5.2 Staattiset suojareleet

Staattisissa eli elektronisissa suojareleissä on jo nimensäkin mukaisesti elektroniikkaa mukana. Tähän perheeseen kuuluvat analogiset tai digitaaliset releet, joissa on käytetty analogisia piirejä tai komponentteja. Staattiset suojareleet koostuvat usein erillisistä moduleista. Jokainen suojaustoiminto on tarvinnut oman modulinsa, samoin erilaiset ajastintoiminnot on toteutettu omilla moduleillaan. [8]

Toteutuksen tilantarve on pieni verrattuna sähkömekaanisiin suojareleisiin. Moduulit on asennettu kaappiin, usein kaapin etulevyyn ja kaapin sisällä on tehty tarvittavat johdotukset. Asettelut on tehty erilaisia potentiometrejä ja keinukytkimiä hyväksikäyttäen. Huoltotarvetta ovat vaatineet mm. laitteissa käytetyt kondensaattorit, jotka ovat aikaa myöten kuivuneet ja aiheuttaneet virhetoimintoja. Potentiometreista johtuvan asettelujen ryöminnän vuoksi suojareleet täytyy koestaa määrävälein. [10]

Varaosia on vielä saatavilla, tosin joiltakin osin rajoitetusti, koska monia laitteissa käytettyjä komponentteja ei enää valmisteta. Asiantuntemusta vielä löytyy, mutta sekin on harvenemaan päin tämän tekniikan osaajien jäädessä eläkkeelle.

Staattisia suojareleitä on käytössä vielä kohtalaisen laajalti Suomessa. Ne tulivat markkinoille 1980-luvulla ja alkavat nyt olla käyttöikänsä päässä[10]. Nykyään ne usein vaihdetaan uusintatöiden yhteydessä numeerisiin suojiin.



Kuva 8 Suojareletyyppejä

Vasemmalla sähkömekaaninen suojarele [11], oikealla staattinen suojarele (valokuva Sanna Häsä)

2.5.3 Numeeriset suojat

Nykyisin käytössä oleva suojarelesukupolvi on numeeriset suojat. Niitä kutsutaan usein myös kennoterminaleiksi tai monitoimisuojiksi. Numeeristen suojien edut verrattuna sähkömekaanisiin ja staattisiin suojareleisiin ovat moninaiset.

Ensinnäkin ne perustuvat mikroprosessoritekniikkaan eivätkä sisällä liikkuvia osia tai huoltoa tarvitsevia komponentteja. Toisekseen yksittäinen laite sisältää useita suojaus- ja mittaustoimintoja, jolloin tarvittavien laitteiden määrä vähenee. Tämän lisäksi laitteisiin voidaan sisällyttää myös ohjaustoimintoja sekä muita signaalituloja ja -lähtöjä. Näin ollen numeeristen suojien tilantarve on pienempi kuin sähkömekaanisilla tai staattisilla suojareleillä, koska yhdellä laitteella voidaan haluttaessa toteuttaa koko tarvittavan kohteen suojaus.

Numeeristen suojien sisältämien itsevalvontatoimintojen ansiosta huollon ja kunnossapidon määrä vähentyy, koska laite osaa itse ilmoittaa vikaantumisestaan eikä sitä tarvitse erikseen tarkastaa. Erilaiset tapahtuma- ja häiriöpäiväkirjat tallentavat tietoa käyttö- ja vikatilanteista, jolloin niiden tarkastelu jälkikäteen on mahdollista.

Numeeriset suojat asennetaan kaappiin samaan tapaan kuin staattiset suojareleetkin. Ne eivät yleensä tarvitse toimiakseen erillisiä lisälaitteita. Suojien etupaneeli on tyypillisesti varustettu näytöllä, käyttöpainikkeilla ja erilaisilla indikaattoreilla. Asettelut tehdään täysin ohjelmallisesti, joko laitteen etupaneelistä näyttöä ja painikkeita käyttäen tai laitteeseen liitettävän PC:n kautta suojan valmistajan konfigurointiohjelman avulla. Tämä mahdollistaa suojaustoimintojen asettelun etukäteen ohjelmaan, jolloin paikan päällä ne tarvitsee vain ladata suojaan.

Ensimmäiset numeeriset suojat tulivat markkinoille 1980-luvun puolivälissä ja sen jälkeen kehitystä on tapahtunut käsi kädessä muun mikroprosessori- ja tiedonkäsittelytekniikan kanssa [10]. Numeerisia suojia käsitellään tarkemmin seuraavissa luvuissa.



Kuva 9 Numeerinen monitoimisuoja [12]

3 GENERAATTORIN SUOJAUS

Vaikka suoja releet onkin kytketty sähköisesti generaattorin toisiopiireihin on niiden päätehtävänä suojata generaattoria, turbiinia ja päämuuntajaa mekaaniselta vaurioitumiselta. [13]

Suojauslaitteiden käytön laajuus ja suojauksen varmistus on aina tapauskohtaisesti harkittava. Valittava suojaustaso riippuu paitsi koneelle aiheutuvan riskin suuruudesta myös laitoksen koosta ja mahdollisen keskeytysvahingon aiheuttamien seurauksien merkityksestä. [13]

Suojauksen mahdollisimman nopean toiminnan lisäksi pyritään vika havaitsemaan mahdollisimman pienellä tehotasolla ja täten helpottamaan aikaa vievää vian korjausta erityisesti, jos levypaketti on valokaariviassa osallisena. [6]

Generaattorin suojauksen tulee olla nopea, koska generaattorin vikaantuessa sitä ei voida irrottaa turbiinista ja turbiinin massaan sitoutunut liike-energia pyörittää generaattoria vielä turbiinin käyttövoiman katkaisemisen jälkeenkin. Äkillisen pysähtymisen seurauksena joko turbiinin ja generaattorin välinen kytkin tai turbiini kärsii huomattavia mekaanisia vaurioita tai saattaa jopa tuhoutua kokonaan. Pelkkä katkaisijan avaaminen generaattorin viassa ei riitä, vaan turbiinin käyttövoima on katkaistava, magnetointi poistettava ja mahdollisesti päästettävä sammutuskaasu generaattoriin.

3.1 Generaattorin viat

Generaattoriin vaikuttavat viat voidaan jakaa kahteen pääryhmään, sisäisiin ja ulkoisiin vikoihin. Sisäiset viat ovat staattorissa ja roottorissa tai magnetointipiirissä esiintyviä, kun taas ulkoiset viat ovat verkossa, blokkimuuntajassa tai turbiinissa oheislaitteineen esiintyviä vikoja. Seuraavalla sivulla on listattu eri lähteissä [14], [6], [15] esitetyistä jaotteluista yhdistetty kooste.

Sisäiset viat:Staattorissa

- Staattorin oikosulku (kaksi- tai kolmivaiheinen)
- Staattorin ylivirta
- Staattorin kierrossulku
- Staattorin maasulku
- Roottorissa, magnetointipiirissä
- Roottorin maasulku (yksin- tai kaksinkertainen)
- Roottorin ylijännite, jännitteen nousu
- Alimagnetointi (osittainen tai täydellinen magnetoinnin puuttuminen)
- Ylimagnetointi (käyttäjän virhe)
- Roottorin ylivirta
- Roottorin kierrossulku (vaiheen sisäinen oikosulku)

Ulkoiset viat: (Järjestelmähäiriöt ja käyttövirheet)Viat verkossa tai muuntajassa

- Epäsymmetrinen kuorma
- Epätahtikäyttö (kapasitiivinen kuorma, pitkä oikosulun kesto)
- Maasulku
- Oikosulut
- Ylikuormitus
- Alitaajuus
- Siirtoverkon häiriötilanteesta johtuva tehonheilahtelu

Viat turbiinissa tai säätäjässä

- Takateho (voimakoneen tippuminen)
- Yli- ja alijännite
- Yli- ja alitaajuus
- Ylimagnetointi (säätäjävirhe)

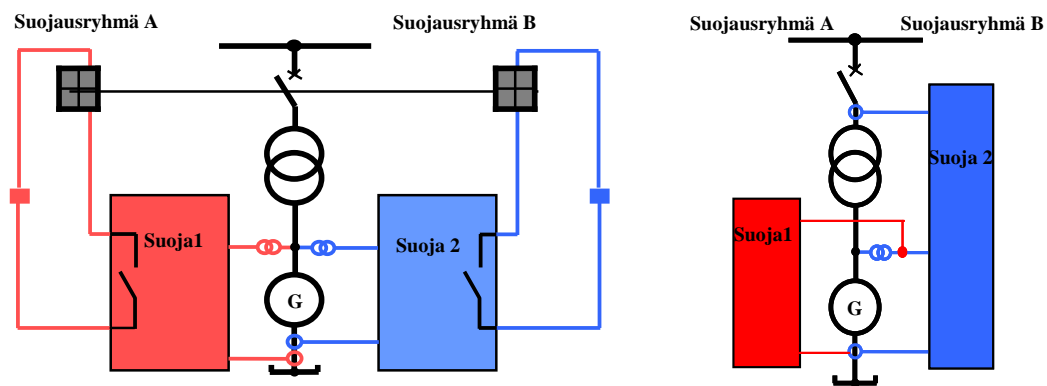
Lisäksi

- Tahaton syötön kytkentä, epätahtikytchentä
- Jännitemittauspiirin vika
- Generaattorikatkaisijan vika
- Laakerivirta
- Jäähdytysjärjestelmän toimintahäiriöt
- Tulipalo

3.2 Suojauksen kahdennus

Suojaus voidaan toteuttaa joko yksinkertaisena, osittain kahdennettuna tai täysin kahdennettuna. Kahdennus voi olla joko toiminnallista tai laitteiden kahdennusta. Toiminnallinen kahdennus tarkoittaa että tietty toiminto voidaan toteuttaa kahdella eri tavalla. Esimerkiksi suojaustoiminto voi olla kahdennettu joko toisella suojaustoiminnolla samassa laitteessa tai kokonaan erillisellä laitteella. Tällöinkin toinen laite voi olla samanlainen kuin alkuperäinen tai täysin erilainen, mutta suorittaa täysin identtisen toiminnon.

Yleensä jos käytössä on useampia suojaareleita tai muita laitteita, niiden apusähkösyötöt otetaan tyypillisesti kahdesta eri akustosta siten, että päälaite ja varalaite syötetään eri paikoista. Täysin kahdennetussa järjestelmässä myös mittamuuntajat on kahdennettu siten, että molemmilla suojaareleilla on omat mittamuuntajansa. Osittain kahdennetussa järjestelmässä osa mittamuuntajista on molemmille suojoille yhteisiä. Yksinkertaisessa suojauksessa sekä mittamuuntajia että suojaareleita on vain yksi. [15]



Kuva 10 Suojauksen kahdennustapoja

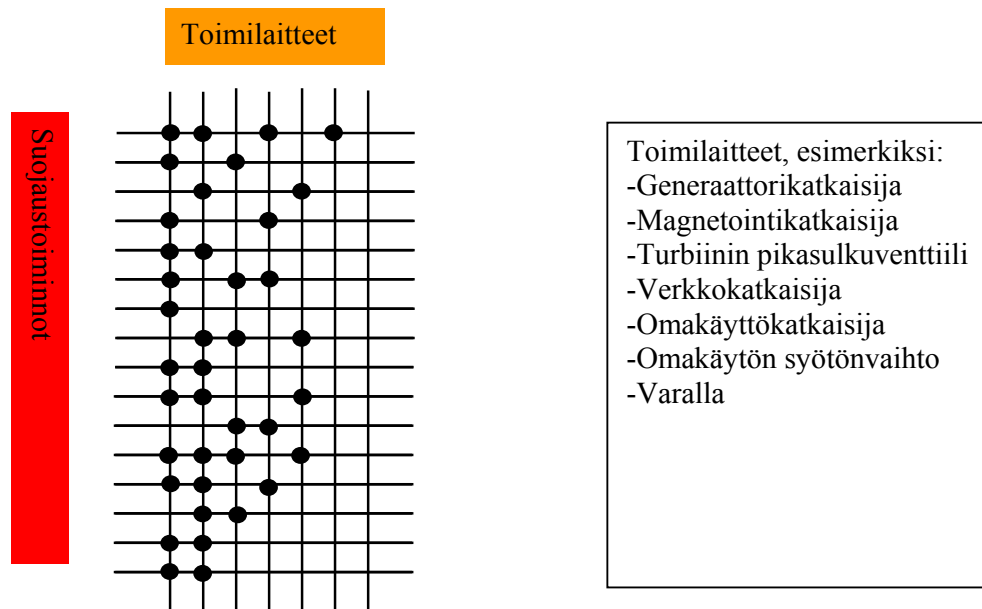
Vasemmalla täysin kahdennettu suojaus, oikealla osittain kahdennettu suojaus [15]

3.3. Laukaisumatriisi

Vanhemmassa sähkömekaanisessa tai staattisessa relesuojauksessa jokaiseen suojaustoimintoon on käytetty erillistä suojaarelettä tai relemodulia. Jokaisesta relemodulista on siis tarvittu laukaisusignaali kyseiseen suojaukseen liittyville toimilaitteille. Tällöin on ollut tarkoituksenmukaista käyttää laukaisumatriisia, jossa jokaiselle toimilaitteelle menevät laukaisusignaalit on koottu yhteen.

Tämä tapahtuu siten, että matriisin tuloihin tulee jokaiselta suojaareleelta tai relemodulilta yksi ohjaussignaali ja lähdöistä lähtee jokaiselle laukaistavalle toimilaitteelle yksi laukaisusignaali. Matriisissa tulot ja lähdöt yhdistetään siten, että

jokaiselle toimilaitteelle lähtee vain yksi laukausignaali, huolimatta siitä kuinka monelta releeltä toimilaitteen ohjaussignaali tulee. Näitä tuloja ja lähtöjä yhdistellään ja erotetaan käsin lisättävillä ja poistettavilla diodeilla. Diodien sijoittelusta näkee helposti mitkä tulot ja lähdöt ovat käytössä. Matriisin läheisyyteen on usein kiinnitetty kaavio, josta näkee tulojen ja lähtöjen liittynät suojareleisiin ja katkaisijoihin.



Kuva 11 Laukaisumatriisin periaate [15]



Kuva 12 Laukaisumatriisi [16]

Nykyisissä numeerisissa suojoissa laukaisumatriisi voidaan toteuttaa ohjelmallisesti. Tämä on mahdollista siksi, että yksi fyysinen laite sisältää monta eri suojaustoimintoa, jolloin erillisiä relemoduleita ei tarvita ja matriisiin tulevat signaalit voidaan käsitellä täysin ohjelmallisesti. Matriisista lähtevät signaalit eli eri katkaisijoiden laukaisusignaalit täytyy toki kaapeloida katkaisijoiden laukaisukeloille, mutta kokonaisuutena johdotettujen signaalien määrä jää huomattavasti pienemmäksi kuin erillisillä suojaareleilla tai relemoduleilla ja erillisellä laukaisumatriisilla toteutetussa ratkaisussa. Tästä on esitetty esimerkki luvussa 7. Koska johdotettuja liityntäpisteitä on vähemmän, myös mahdollisten vikapaikkojen määrä pienenee.

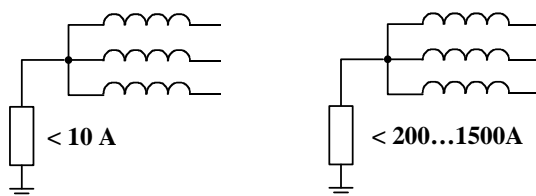
3.4 Generaattorin tähtipisteen maadoitustavat

Generaattori voidaan maadoittaa usealla eri tavalla. Staattorin tähtipisteen maadoitustapa vaikuttaa maasulussa esiintyvän vikavirran suuruuteen. Teknisesti paras tapa generaattorin kannalta olisi maasta erotettu tähtipiste erittäin pienten vikavirtojen vuoksi, jolloin laitevauriot ovat minimaaliset, eikä järjestelmää siten ole tarvetta erottaa välittömästi vian sattuessa. Tämän vuoksi maasta erotettua järjestelmää käytetään usein teollisuuslaitoksissa haluttaessa minimoida käyttökatojen määrä. Koska maadoittamattomat järjestelmät ovat alttiita korkeille ja tuhoisille transiienttiylijännitteille, jotka voivat aiheuttaa vaaraa henkilöturvallisuudelle ja laitteille, ei niiden käyttö kuitenkaan ole suositeltavaa. [14]

Maadoitustapoja voidaan luokitella hieman eri tavoin [8] [13] [14]. Lähteessä [13] on esitelty seitsemän maadoitustapaa, joista neljä on tehty tähtipisteessä. Nämä maadoitustavat ovat; suuri- tai pieniohmisesti resistanssin kautta maadoitettu, induktanssin kautta maadoitettu, jakelumuuntajan kautta kahdella eri tavalla maadoitettu. Lisäksi toisessa lähteessä [14] on esitetty vielä suoraan maadoitetun tähtipisteen tapaus. Generaattori voidaan maadoittaa myös erillisen maadoitusmuuntajan avulla, joka on kytketty generaattorin napojen puolelle, tähtipisteen ollessa maasta erotettu. [13] Tämä vaihtoehto jätetään käsittelemättä.

3.4.1 Suuri- tai matalaohmisesti resistanssin kautta maadoitettu generaattori

Suuriohmisessa maadoituksessa resistanssi on yleensä mitoitettu niin, että maasulkuvirta rajoitetaan korkeintaan 10A:iin. Joissakin tapauksissa resistanssin yli on kytketty jännitemuuntaja mittausta ja suojausta varten. Tällöin muuntajan mitoitus tehdään samoin kuin jakelumuuntajan tapauksessa. [13]



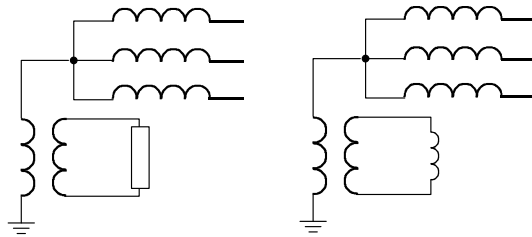
Kuva 13 Resistanssimaadoitettu tähtipiste

Vasemmalla suuriohminen maadoitus, oikealla matalaohminen maadoitus

Matalaohminen maadoitus on muunnos suuriohmisesta resistanssin kautta maadoitetusta tapauksesta. Tässä tapauksessa vikavirrat ovat suuria, jopa 1500A tai enemmän. [13] Järjestelmän etuna ovat matalat transienttiylijännitteet, joka mahdollistaa maasulkusuojauksen toiminta-alueeksi 95...98 %. Haittana ovat suuret vahingot generaattorille vian kestäessä pitkään. Käytetään yleensä teollisuussovelluksissa.

3.4.2 Jakelumuuntajan kautta maadoitettu (rinnakkaisresistanssi tai –induktanssi)

Muuntajan ensiöjännitteeksi on valittu vähintään generaattorin nimellisjännite. Toisiojännite on tyypillisesti 100...500V. Muuntajan jännitemitoituksen tulee olla riittävä, jotta se ei kyllästy maasulkutilanteessa, jossa generaattori toimii 1,05-kertaisella liitinjännitteellä. Muuntajan rinnalle kytketty resistanssi valitaan käyttäen suuriohmisen maadoituksen mitoituskriteerejä siten, että maasulkuvirta rajoitetaan korkeintaan 10A:in. [13]



Kuva 14 Jakelumuuntajamaadoitettu tähtipiste
Vasemmalla rinnakkaisresistanssi, oikealla rinnakkaisinduktanssi.

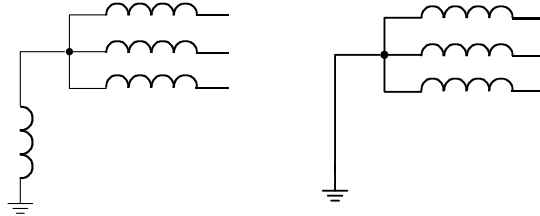
Rinnakkaisinduktanssin tapaus on sama kuin edellinen, nyt kuitenkin muuntajan rinnalle kytketyn resistanssin tilalla induktanssi. Induktanssi mitoitetaan siten, että sen arvo katsottuna ensiöpuolelta vastaa kolmasosaa nollajärjestelmän kapasitiivisesta reaktanssista kun mukaan lasketaan generaattori, johtimet ja blokkimuuntajan alajännitepuoli. Tämän tyyppinen maadoitus rajoittaa yksinkertaisen maasulkuvirran alle 1A, jolloin valokaari sammuu. Tämä maadoitustapa ei sovellu, jos piirin kapasitanssi muuttuu järjestelmän eri käyttötilanteiden seurauksena. [13]

3.4.3 Induktanssin kautta maadoitettu generaattori

Tässä tapauksessa tähtipiste on maadoitettu pienen induktanssin kautta siten, että sallitut vikavirrat ovat paljon suurempia kuin suuriohmisen resistanssin kautta maadoitetussa tapauksessa, tyypillisesti 25...100% generaattorin kolmivaihevikavirrasta. [13]. Käytetään harvoin, pääasiassa vanhoissa laitoksissa.

3.4.4 Tehollisesti eli suoraan maadoitettu

Etuina matalat transienttijännitteet ja hyvät mittaolosuhteet suojaukselle. Haittana suuret vahingot generaattorille suurten maasulkuvirtojen vuoksi ja nollajärjestelmän vuotovirrat. Käytetään pienjännitegeneraattoreissa.[14]



Kuva 15 Muita tähtipisteen maadoitustapoja

Vasemmalla induktanssin kautta maadoitettu, oikealla tehollisesti maadoitettu tähtipiste

3.5 Generaattorin suojaustoiminnot

Tässä työssä keskitytään tarkastelemaan yli 50 MVA umpinapageneraattoreita. Tyypillisimmät suojaustoiminnot tämän kokoluokan generaattoreille on esitetty taulukossa 1. Toiminnot on ryhmitelty siten, että staattoriin liittyvät ovat ensiksi, sitten roottorin ja magnetoinnin suojaus ja viimeisenä jännite- ja taajuussuojaukset epätahtisuojaus mukaan lukien.

Käytettävistä standardeista riippuen suojaustoimintojen esittämiseen voidaan käyttää ANSI-järjestelmän tai IEC-normiston mukaisia koodeja. Tässä on käytetty ANSI-koodeja.

Taulukko 1 Generaattoreille suositellut suojaustoiminnot [15]

Suojaus	ANSI-koodi	Generaattorin Nimellisteho (MVA)			
		< 5	5-50	50-200	>200
Erovirta	87G, 87T	o	X	X	X
Impedanssi	21			X	X
Vakioaikaylivirta	50, 51V	X	X	o	o
Staattorin ylikuorma	49	X	X	X	X
Kierrossulku				X	
Takateho	32	X	X	X	X
Staattorin maasulku 90%	64,54N,67N	X	X	X	X
Staattorin maasulku 100%	64 (100%)			X	X
Roottorin maasulku	64R	o	X	X	X
Vinokuormitus	46		X	X	X
Roottorin ylikuorma	49R				X
Ylijännite	59	X	X	X	X
Alijännite	27	Y	Y	Y	Y
Alimagnetointi	40	o	X	X	X
Ylimagnetointi	24		o	X	X
Ylitaajuus	81	X	X	X	X
Alitaajuus	81		X	X	X
Epätahti	78				X

Y=pumppuvoimalaitoksilla, o=optio

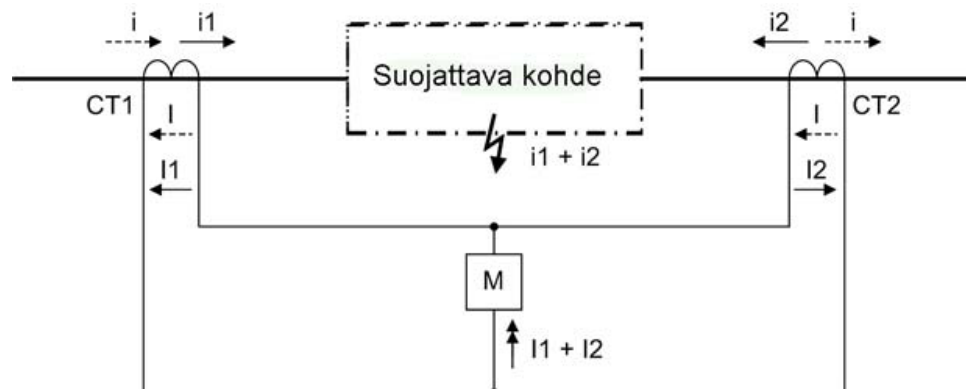
Joihinkin taulukossa 1 esitettyihin suojaustoimintoihin on olemassa vaihtoehtoisia toteutustapoja. Tällaisia suojaustoimintoja ovat esimerkiksi staattorin maasulkusuojaus, joka voidaan toteuttaa siten, että se kattaa joko 90 % tai 100 % staattorikäänmistä. Tämän lisäksi staattorin 100 % maasulkusuojaus voidaan toteuttaa kahdella eri tavalla, joko tarkastelemalla kolmannen yliaallon esiintymistä tähtipisteessä tai syöttämällä

aliharmonista jännitettä tähtipistemuuntajan kautta staattoriin ja mittaamalla sen aiheuttaman virran esiintymistä tähtipisteessä.[17]

Myös roottorin maasulkusuojaukseen yleisesti käytettyjä menetelmiä on kaksi, joista ensimmäinen perustuu nimellistaajuuden vaihtojännitteen ja toinen pientaajuuden tasajännitteen käyttäytymiseen roottoripiirissä [17]. Näitä maasulkusuojausmenetelmiä tarkastellaan lähemmin liitteissä A, B, C ja D. Seuraavaksi käydään lyhyesti läpi taulukossa 1 esitetyt generaattoreiden yleisimmät suojausfunktiot.

3.5.1 Erovirtasuojaus

Erovirtasuojaus toimii generaattorin ensisijaisena suojaustoimintona. Erovirtasuojaus toimii virtavertoperiaatteella. Toimintaperiaate perustuu määritelmään, jossa suojattavan kohteen läpi kulkee virta i (katkoviiva kuvassa 16) normaalissa terveessä käyttötilanteessa. Tämä virta kulkee suojausalueen toisesta päästä sisään ja vastaavasti toisesta päästä ulos. Virtaero on luotettava tunniste suojausalueen sisäisessä vikatilanteessa. Virtamuuntajat CT1 ja CT2, joiden muuntosuhteet ovat samat, voidaan kytkeä siten, että suljetussa virtapiirissä kulkisi toisiovirta I ja poikittain kytketyssä mittauspiirissä M ei kulkisi häiriöttömässä käyttötilanteessa virtaa. [18]



Kuva 16 Kaksipisteisen erovirtasuojauksen peruseriaate [18]

Jos suojausalueella on häiriö, esiintyy suojalla virta $i_1 + i_2$ joka muodostuu vikavirroista $I_1 + I_2$. Kuvassa 16 on esitetty yksinkertaistettu sijaiskytkentä tilanteessa jossa oikosulku on suojausalueella ja mittauspiirin M kautta kulkee riittävä vikavirta, jonka avulla suoja voi toimia luotettavasti. Suojausalueen ulkoisissa vioissa, joissa suojausalueen läpi kulkee suuri virta, virtamuuntajien CT1 ja CT2 magneettisista eroavaisuuksista johtuen voi virtamuuntajien kylläystilanteessa kulkea merkittävän suuri virta mittauselementin M kautta. Jos erovirta on suurempi kuin vastaava havahtumisarvo, voi laite suorittaa laukaisun vaikka suojausalueella ei vikaa olisikaan. Virtavakavointitoiminta estää tämänkaltaisen virheellisen laukaisun. [18]

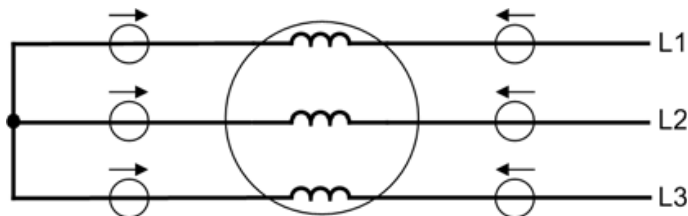
Kaksipisteisissä erovirtasuojajärjestelmissä vakavointisuure muodostetaan joko erovirran $|I_1 - I_2|$ tai aritmeettisen summan $|I_1| + |I_2|$ mukaisesti. Seuraava määrittely pätee kaksipisteiselle suojaukselle:

Laukaisu- tai erovirtasuure $I_{\text{diff}} = |I_1 + I_2|$

ja vakavointisuure $I_{\text{stab}} = |I_1| + |I_2|$

I_{diff} muodostetaan perustaajuisesta virrasta, joka toimii myös laukaisusuurena I_{stab} virran vakavoidessa sitä. [18]

Suojausalue rajautuu tarkasti suojattavan kohteen molemmin puolin oleviin virtamuuntajiin. Generaattoreilla virtamuuntajat sijoitetaan tähtipisteen liittimiin ja toiset virtamuuntajat syöttöpuolen liittimiin. Virtojen suunnaksi määritellään yleensä suunta, jossa virta kulkee suojattavaan kohteeseen päin, kuten kuvassa 17 on esitetty. [18]



Kuva 17 Pitkittäiserovirtasuojan virtojen suunnat [18]

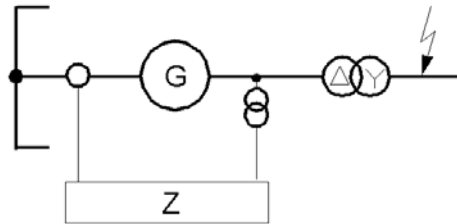
Erovirtasuoja muuntaa nimellisvirrat vastaamaan suojattavan kohteen nimellisvirtaa. Asetteluilla ilmaistaan suojalle koneen nimellistiedot, kuten näennäisteho, nimellisjännite ja virtamuuntajien nimellisvirrat. Mittausarvojen sovitusta suoritetaan muunnoskertoimin. [18]

Nopea vakavoimaton laukaisu suurivirtaisissa vioissa

Suurivirtaiset viat suojausalueella laukaistaan viiveettä ilman vakavointivirtoja, kun virran suuruus sulkee pois ulkoiset häiriöt. Jos suojattavan kohteen impedanssi on suuri (muuntajat, generaattorit, sarjakelat) voidaan tämä havahtumisarvo asettaa suuremmaksi kuin läpimenevä vikavirta voi olla. [18]

3.5.2 Impedanssisuojaus

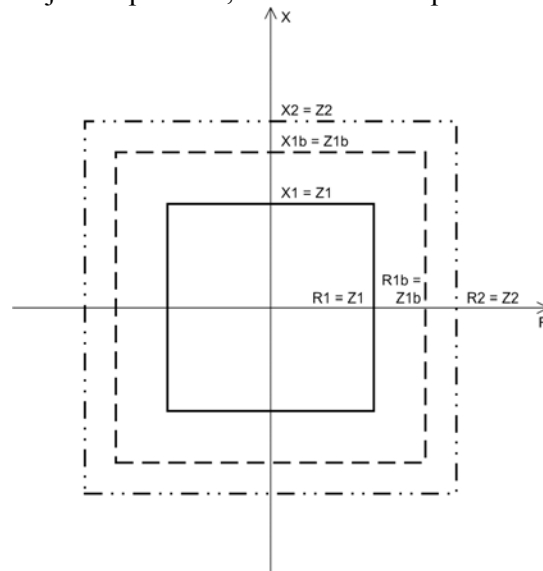
Impedanssisuojaa käytetään generaattoreilla aikaselektiivisenä suojana mahdollistamaan lyhyin mahdollinen laukaisuaika oikosuluissa suojausalueen ollessa generaattorin navoilta blokkimuuntajan alijännitekäämeihin. Se on täten generaattorin ja muuntajan erovirtasuojien nopea varasuoja. Lisäksi impedanssisuoja toimii viivästettynä ylivirtasuojana oikosuluilla, jotka esiintyvät blokkimuuntajan yläjännitepuolella, toimien täten pääsuojien varasuojana.



Kuva 18 Impedanssisuojauksen periaate [18]

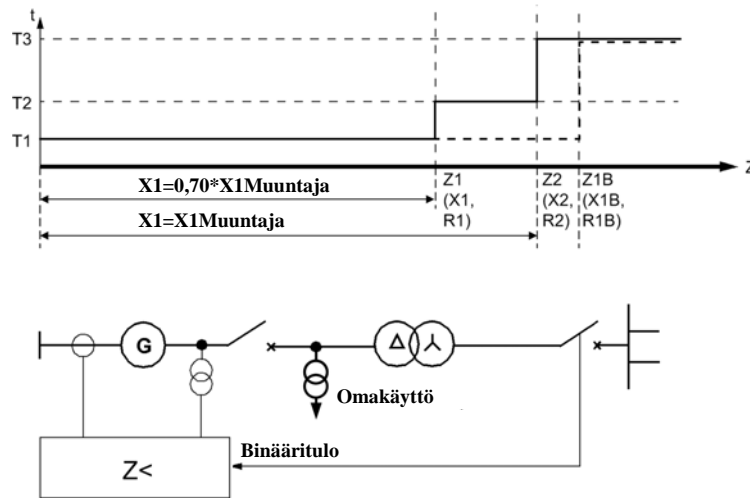
Generaattorin impedanssisuojan laukaisukoordinaatisto on monikulmio, kuten kuvassa 18 on esitetty. Se on muodoltaan symmetrinen, vaikka vika taakse-suunnassa (negatiiviset R ja/tai X -arvot) on mahdoton normaalitilanteessa, jossa suoja on kytketty generaattorin tähtipisteen puoleisiin virtamuuntajiin. Monikulmio on täysin määritelty yhden parametrin, impedanssin Z , avulla. [18]

Koska impedanssisuoja on moniportainen, suojattavat vyöhykkeet voidaan valita siten, että ensimmäinen porras $Z1$ kattaa viat generaattorissa ja päämuuntajan alajännitepuolella, kun taas toinen porras $Z2$ kattaa verkon.



Kuva 19 Impedanssisuojan laukaisukoordinaatisto [18]

Voi olla toivottavaa, riippuen voimalaitoksen kytkentäjärjestelyistä, laajentaa nopea laukaisuvyöhyke Z1 yliulottumavyöhykkeelle. Esimerkiksi jos verkkokatkaisija on auki, esiintyvä vika voi olla ainoastaan voimalaitoksen alueella. Jos verkkokatkaisijan asento tuodaan katkaisijan apukoskettimilta suojareleelle, voidaan tämän tiedon avulla aktivoida yliulottumavyöhyke Z1B. Tilannetta on havainnollistettu kuvassa 20.



Kuva 20 Impedanssisuojan asetteluvyöhykkeet –esimerkki [18]

Dynaamisen muutoksen jälkeen, joka voi aiheutua tehon heilahteluista, oikosuluista, jälleenkytkennöistä tai kytkentätoimenpiteistä, generaattoreiden tulee mukautua verkon uuteen kuormitustilanteeseen. Jotta suoja ei suorittaisi luvattonta laukaisua, impedanssisuojatoiminta on varustettu tehonheilahtelulukituksella.

Tehonheilahtelu on kolmivaiheinen symmetrinen tapahtuma. Toiminnan ensimmäinen tunniste on virtojen symmetrisyys joka määrittellään virtojen vastakomponentin avulla. Epäsymmetriset oikosulut eli kaikki yksivaiheiset ja kaksivaiheiset viat eivät saa tehonheilahtelusalpatoimintaa havahtumaan. Myös silloin jos tehonheilahtelu on tunnistettu, aiheuttaa epäsymmetrinen oikosulku tehonheilahtelutoiminnan päättymisen ja impedanssisuojan nopea laukaisu on mahdollista. Heilahteluvaiheen tunnistus tapahtuu mittaamalla impedanssivektorin muutosnopeutta. Koska tapahtuma on symmetrinen, määrittely tapahtuu myötäkomponenttien avulla. Tehonheilahteluilmiön syntyä ja ominaisuuksia sekä sen havaitsemista on kuvattu tarkemmin epätahtisuojaan yhteydessä kappaleessa 3.7.

3.5.3 Vakioaikaylivirtasuojaus

Ylivirta-aikasuoja tarkoitus on toimia oikosulkusuoja. Se toimii pääoikosulkusuojen kuten erovirta- tai impedanssisuojan varasuojana. Myös verkkohäiriöissä, joita ei

laukaista riittävän nopeasti pois ja voivat täten vaurioittaa generaattoria, ylivirta-aikasuoja toimii varasuojana.

Generaattoreilla, joiden magnetointijännite otetaan generaattorin navoilta, oikosulkuvirta laskee lähellä olevissa vioissa eli generaattorin tai blokkimuuntajan alueella nopeasti alle ylivirtasuojan havahtumisarvon johtuen puuttuvasta magnetointivirrasta.

Suojassa on alijänniteporras, joka aktivoituu kun jännitteen myötäjärjestelmäkomponentti alittaa asetellun arvon. Aktivoituessaan alijänniteporras pitää ylivirtasignaalin havahtumaa voimassa asetellun ajan vaikka virta-arvo olisikin laskenut jo alle asetellun arvon. Tällä tavoin voidaan varmistaa että suoja suorittaa laukaisun aikaviiveen jälkeen edellä kuvatuissa vikatilanteissa.

Jos jännite nousee yli asetellun alijänniterajan ennen kuin havahtumissignaalin pitoaika on kulunut umpeen, palautuu ylivirtasuoja normaaliin toimintaan. Alijänniteporras voidaan lukita binaarisen tulon kautta esim. jännitemuuntajan suojakytkimen lauetessa. [18]

3.5.4 Staattorin ylikuormitussuojaus

Ylikuormitussuojalla suojataan generaattorin staattorikäämejä ylikuormittumiselta. Suoja laskee yllämpenemän lämpötilan kuvaajan mukaisesti differentiaalikaavalla. Kuvaaja ottaa huomioon sekä aiemmat ylikuormitustilanteet että lämpöhäviöt ympäristöön.

Suoja laskee generaattorin käyttölämpötilan prosentteina suurimmasta sallitusta käyttölämpötilasta. Lämpenemän ylittäessä ensimmäisen asetellun portaan seuraa hälytys, jolloin generaattorin kuormitusta voidaan vähentää. Lämpötilan saavuttaessa toisen asetellun lämpötilarajan, erotetaan generaattori verkosta. Laukaisukäsky annetaan korkeimman lasketun lämpötilan mukaan. [18]

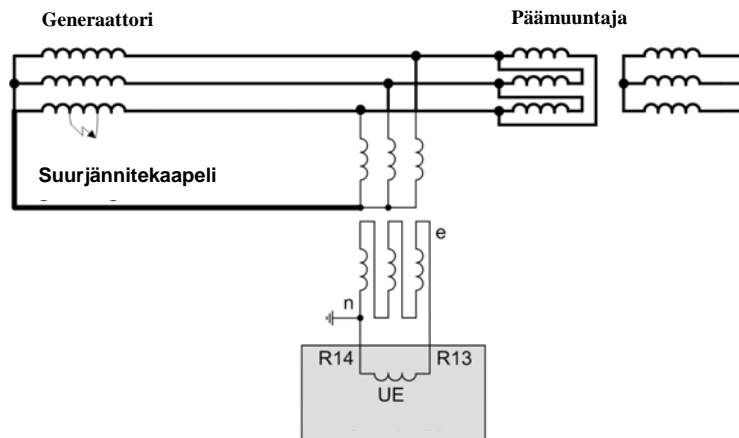
Staattorin ylikuormitussuojan tarpeellisuus riippuu siitä, pystyykö turbiini tuottamaan ylikuormaa generaattoriin nähden.

3.5.5 Kierrossulkusuojaus

Kierrossulkusuojaus havaitsee käämivyyhtien kierrosten väliset viat generaattorin vaihekäämityksissä. Tällaiseen tilanteeseen saattaa liittyä suhteellisen suuret virrat, jotka kulkevat oikosulkeutuneissa käämivyyhdeissä ja vaurioittavat käämitystä ja staattoria. Suojaustoiminto on tyypillisesti erittäin herkkä.

Ottaen huomioon generaattoreiden rakenteen, on kierrossulun esiintyminen epätodennäköistä. Generaattorit, joissa on erillinen staattorikäämitys, esimerkiksi suuret vesivoimageneraattorit, ovat herkempiä kierrossuluille. Tällaisessa rakenteessa käytetään kuitenkin usein poikittaista erovirtasuojasta tai nollavirtasuojasta kierrossulkusuojauksen sijaan. [18]

Mittauksessa käytetään kolmea kaksinapaisesti eristettyä jännitemuuntajaa, jotka on kytketty ensiöpuoleltaan tähteen ja toisiopuoleltaan avokolmioon. Tilanteessa jossa generaattorissa on kierrossulku, jännite kyseisessä vaiheessa pienenee ja vaihejännitteiden nollapiste siirtyy muodostaen täten nollajännitteen avokolmiokäämitykseen. Tämä jännite mitataan herkän kierrossulkusuojan avulla. [18]



Kuva 21 Kierrossulkusuojauksen mittauskytkentä [18]

Ollakseen epäherkkä maasululle eristetty jännitemuuntajan tähtipiste kytketään generaattorin tähtipisteeseen suurjännitekaapelin avulla. Jännitemuuntajien tähtipistettä ei saa maadoittaa, koska tällöin myös generaattorin tähtipiste maadoittuisi, ja jokainen maasulku johtaisi yksivaiheiseen maaoskukseen. [18]

Niin kauan kun generaattorissa ei ole kierrossulkuja ei avokolmioon synny perustajuisia jännitteitä. Avokolmioon syntyvät yliaallot suodatetaan suojalla numeerisen suodattimen avulla. Suojauksen herkkyyttä rajoittaa ennemminkin käämityksen epäsymmetria kuin suojaus.

3.5.6 Takatehosuojaus

Takatehosuojaa käytetään turbiinigenaattoriyksikön suojaukseen tilanteissa, joissa turbiinia pyörittävä voima häviää ja generaattori alkaa pyörittää turbiinia moottorin lailla ottaen tarvittavan energian verkosta. Tämä tilanne johtaa turbiinin siipien ylikuumenemiseen ja tulee poistaa nopeasti avaamalla verkkokatkaisija.

Lisäksi generaattorille on riskinä, että jäännöshöyryn vuotaessa viallisten sulkuventtiilien vuoksi, katkaisijan avaamisen jälkeen turbiini lähtee ryntäämään joutuen siten ylikierroksille. Tämän vuoksi järjestelmän erottamisen tulee tapahtua ainoastaan pätoehon havaitsemisen jälkeen. Takatehosuojausta hyödynnetään myös käyttötoimenpiteenä irrotettaessa generaattoria verkosta.

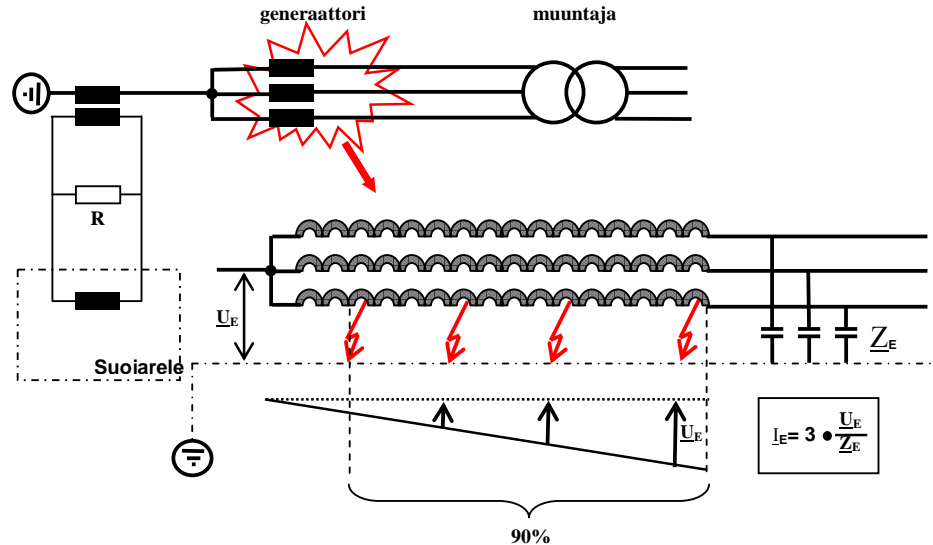
3.5.7 Staattorin 90% maasulkusuojaus

Staattorin maasulkusuoja tunnistaa maasulun staattorikäämyksessä kolmivaiheisilla generaattoreilla, jotka on kytketty verkkoon blokkimuuntajan kautta. Maasulku staattorissa tunnistetaan nollajännitteen avulla. Toiminnan avulla saavutetaan staattorikäämyksen suojausalueeksi 90...95%.[18]

Avokolmiojännite voidaan mitata generaattorin tähtipisteestä jännitemuuntajan tai maadoitusmuuntajan avulla. Mittaus on mahdollista toteuttaa myös jännitemuuntajien avokolmioikämiin (e-n) tai vaiheisiin kytkettyjen maadoitusmuuntajien mittauskäämin avulla. Tähtipisteen maadoitusmuuntajan tai vaiheisiin kytkettyjen maadoitusmuuntajien syöttämä nollajännite on yleensä täydessä maasulussa 500V, jolloin mittauspiiriin tulee liittää 500V/100V sovitusmuuntaja.

Nollajännitteen mittaustavasta riippumatta summautuu jokaisen vaiheen kolmas harmoninen komponentti mittaajajännitteeseen, koska ne ovat kiertovirtajärjestelmässä samanvaiheisia. Jotta ei-toivotut mittaussuureet eivät vaikuttaisi maasulkusuojan toimintaan, suodattaa suoja mittaajajännitteestä perusaallon toimintaansa varten numeerisen suodattimen avulla. [18]

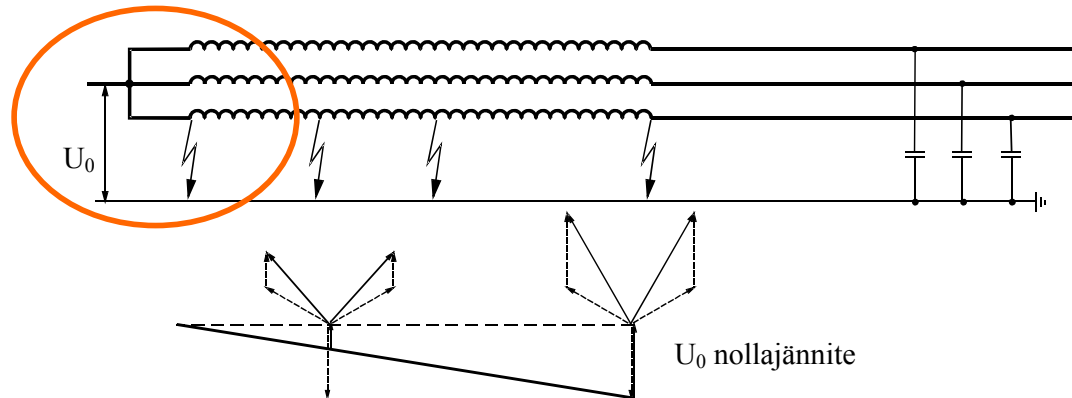
Suojauksen herkkyyttä rajoittaa ainoastaan verkossa esiintyvät maasulut. Nämä häiriöjännitteet siirtyvät generaattorin puolelle blokkimuuntajan kytkentäkapasitanssien kautta. Edellä mainittua häiriöjännitteen vaikutusta voidaan pienentää kuormitusvastuksen avulla.



Kuva 22 Staattorin maasulku [5]

3.5.8 Staattorin 100% maasulkusuojaus

Edellä kappaleessa 3.5.7 kuvattiin staattorin maasulkusuojausta nollajännitteen avulla. Lähellä tähtipistettä tapahtuvissa maasuluissa nollajännite U_0 menee nollaan. Suojaus, jossa käytetään kriteereinä nollajännitettä ja maasulkuvirtaa, ei tällöin toimi.



Kuva 23 Nollajännitteen esiintyminen generaattorin tähtipisteessä [5]

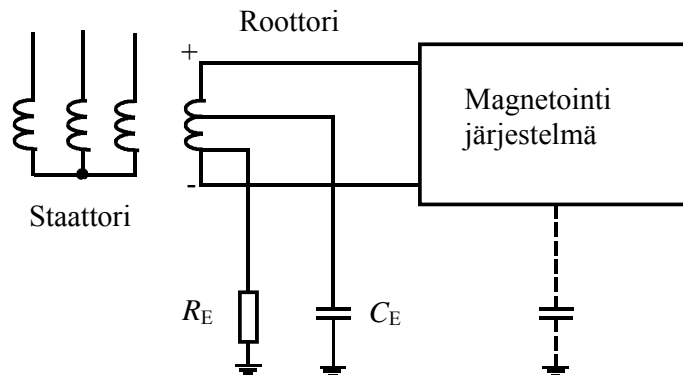
Tällaisessa tapauksessa vaihtoehtona on käyttää jotakin nollajännitteen mittauksesta riippumatonta menetelmää. Yleisesti käytettyjä menetelmiä staattorin 100 % maasulkusuojaukseen on olemassa kaksi, joista toinen perustuu kolmannen yliaallon mittaukseen (3.yliaalto-menetelmä) ja toinen aliharmonisella taajuudella (Euroopassa tyypillisesti 20Hz) syötetyn jännitteen aiheuttaman virran mittaukseen (20Hz-menetelmä). Molemmista menetelmistä on kerrottu tarkemmin liitteissä A ja B.

Kolmannen yliaallon mittaukseen perustuvassa menetelmässä on heikkouksia, kuten katvealue, jolla tapahtuvia maasulkuja suojarele ei havaitse [8] sekä se, että kolmannen yliaallon muodostumiseen staattorissa vaikuttavat myös useat normaaliin käyttöön liittyvät tekijät, jotka voivat aiheuttaa suojareleen virheellisen toiminnan [17].

Kuten lähteessä [17] on todettu, aliharmonisen taajuuden syöttöön perustuvassa menetelmässä on kaksi selkeää etua verrattuna kolmannen yliaallon valvontaan perustuvaan menetelmään, joista ensimmäinen on että maasulkusuojaus on toiminnassa myös generaattorin ollessa pysähdyksissä ja toinen se että generaattorin kuormitus ei vaikuta suojauksen herkkyyteen.

3.5.9 Roottorin maasulkusuojaus

Roottorin maasulkusuojaajan tehtävänä on tunnistaa tahtikoneiden magnetointipiirissä esiintyvät maasulut. Maasulku roottorikäämissä ei aiheuta välitöntä vahinkoa. Vasta jos piiriin tulee toinen maasulku, johtaa se magnetointikäämin kierrossulkuun. Tämä aiheuttaa magneettisen epätasapainon, jonka aiheuttamat erittäin suuret mekaaniset epätasapainovoimat ja värähtelyt sekä suuret virrat vikapaikassa voivat johtaa koneen vaurioitumiseen. [18]



Kuva 24 Maasulku roottorissa [5]

Roottorin maasulkusuojaukseen käytetään nykyään kahta eri tapaa. Ensimmäinen tapa on syöttää nimellistaajuista jännitettä roottoripiiriin ja tarkastella sen aiheuttaman virran avulla maasulkupiirin resistanssiarvoa (f_n -R –menetelmä). Toinen tapa on syöttää pientaajuista kanttiaaltomuotoista tasajännitettä napaisuuden vaihtomenetelmän (1...3Hz-menetelmä) avulla magnetointipiiriin ja tarkastella sen siirtymistä maasulkupiiriin. Tarkempi kuvaus molemmista menetelmistä on esitetty liitteissä C ja D.

f_n -R-menetelmän huonona puolena on se, että osa jännitteen aikaansaamasta virrasta kulkeutuu roottorikäämityksen kapasitanssin kautta roottorin runkoon ja sieltä laakereiden läpi maahan. Tällöin syntyy laakerivirtoja ja aiheutuu mahdollisesti myös laakerimetallin eroosiota. [13]

1...3Hz:n menetelmän etuina verrattuna edelliseen on suurempi herkkyys [13]. Tämän vuoksi sitä käytetään etenkin suurissa generaattoreissa. Myös roottorin maakapasitanssin aiheuttamat häiriöt on eliminoitu paremmin sekä toiminnon häiriönsieto magnetointilaitteiston yliaalloille (esim. 6:s yliaalto) on suurempi kuin f_n -R -menetelmässä [15]. Menetelmällä voidaan havaita maasulut myös seisovassa generaattorissa.

3.5.10 Vinokuormitussuojaus

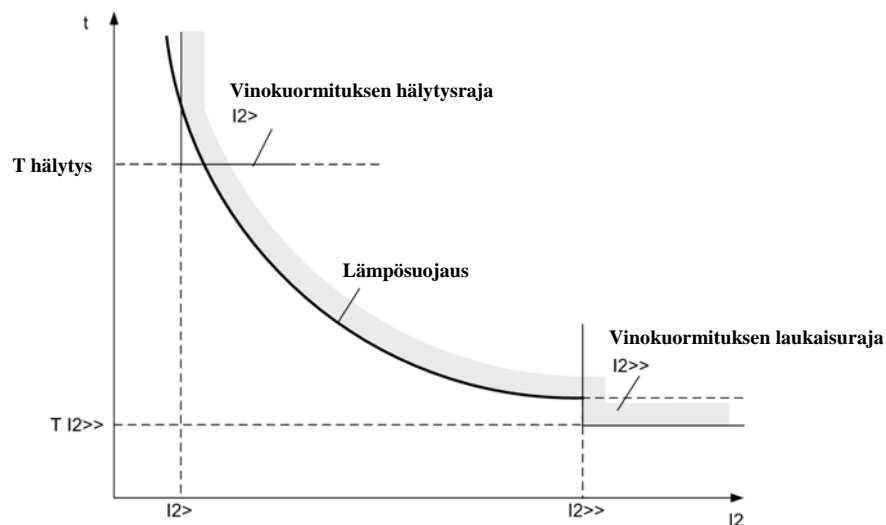
Vinokuormitussuojan tehtävänä on tunnistaa epäsymmetrinen kuormitus kolmivaiheisilla generaattoreilla. Epäsymmetrinen kuormitus synnyttää vastakiertokentän, joka vaikuttaa roottoriin kaksinkertaisella taajuudella. Roottorin pintaosiin indusoituu pyörrevirtoja, jotka aiheuttavat paikallisesti lämpenemiä roottorin osien reuna-alueisiin ja epäjatkuvuuskohtiin. [18]

Lisäksi suojaa voidaan käyttää havaitsemaan johtimen katkeaminen sekä viat ja napaisuusongelmat virtamuuntajissa. Se on erityisen käyttökelpoinen havaitsemaan vaihe-maa, vaihe-vaihe ja kaksoismaasulkuja joiden suuruus on pienempi kuin suurin kuormitusvirta. [18]

Suoja suodattaa vaihevirroista perusaallot ja muodostaa niistä symmetriset komponentit. Symmetrisistä komponenteista muodostetaan vastajärjestelmän virran vastakomponentti I_2 .

Vinokuormitussuoja määrittelee roottorin lämpenemän termisen lämpökuvaajan avulla, joka perustuu virran vastakomponenttiin I_2 . Suhteellinen yllilämpenemä lasketaan termisellä differentiaalikaavalla. [18]

Lämpenemän ylittäessä ensimmäisen asetellun portaan seuraa hälytys. Lämpötilan saavuttaessa toisen asetellun lämpötilarajan, voidaan generaattori irrottaa verkosta.



Kuva 25 Vinokuormitussuojan laukaisukäyrä [18]

3.5.11 Roottorin ylikuormitussuojaus

Roottorin ylikuormitussuojaus toimii samaan tapaan kuin kappaleessa 3.5.4 esitetty staattorin ylikuormitussuojaus. Roottorin yllämpö lasketaan käyttäen vaihevirtojen korkeinta arvoa. Suoja laskee yllämpölämpenemän roottorin lämpötilakuvaajan mukaisesti, perustuen valmistajan ilmoittamiin roottorikäämitykselle sallittuihin arvoihin. Kuvaaja ottaa huomioon sekä aiemmat ylikuormitustilanteet että muut käyttöolosuhteet. Lämpenemän ylittäessä asetellun portaan seuraa merkinanto. [18]

3.5.12 Ylijännitesuojaus

Ylijännitesuojan tehtävänä on suojata konetta ja siihen liitettyä kojeistoa ei-toivotuilta jännitteen nousuilta. Jännitteen nousua voi esiintyä esimerkiksi magnetointijärjestelmän virheellisestä käsiohjauksesta, viallisesta jännitteensäätäjistä, täydessä kuormassa olevan generaattorin laukaisusta, verkosta erotetussa generaattorissa tai saarikäyttötilanteessa.

Ylijännitesuoja tarkkailee kaikkia kolmea vaihe- tai pääjännitettä. Kahden portaan avulla voidaan korkea ylijännite laukaista lyhyellä aikaviiveellä ja pienet ylijännitteet pitemmällä aikaviiveellä, jotta jännitteensäätäjä ehtii korjata pienet jännitepoikkeamat. Ylijännitesuojaa aseteltaessa tulee ottaa huomioon jännitteensäätäjän toiminta-aika, jotta välttyttäisiin turhilta laukaisuilta. [18]

3.5.13 Alijännitesuojaus

Alijännitesuoja suojaa ensisijaisesti energiaa kuluttavia koneita, jotka ovat tyypillisesti epätahtimoottoreita, vaarallisilta alijännitetilanteilta saariverkoissa ja estää ei-toivotut käyttötilanteet ja mahdollisen stabiilisuuden häviämisen. Generaattoreissa sitä käytetään ainoastaan pumppuvoimalaitoksilla. Kantaverkossa sitä voidaan käyttää myös kuorman pudotuksen kriteerinä. [18]

3.5.14 Alimagnetointisuojaus

Alimagnetointisuoja suojaa tahtikonetta magnetoinnin häiriöiltä ennen sen joutumista epätahtikäyntiin ja se suojaa roottoria yllämpölämpenemältä. Se estää verkon stabiiliteetin häiriintymisen, joka voi seurata suurten tahtikoneiden alimagnetoinnista.

Suojarele käyttää alimagnetointitilanteen tunnistuksessa kaikkia kolmea käämin virtaa ja kaikkia kolmea jännitettä staattoripiirin kriteerinä sekä magnetointijännitettä ja/tai magnetointijännitteen valvonnan signaalia roottoripiirin kriteerinä. [18]

Staattoripiirin kriteerinä lasketaan virtojen ja jännitteiden myötäkomponenttien admittanssi. Johdinarvojen mittausten avulla voidaan määritellä fysikaalisesti oikeat vakavointirajat myös tilanteissa, joissa jännite poikkeaa nimellisjännitteestä. Tällaisissa tilanteissa suojan ominaiskäyrä voidaan määritellä optimaalisesti vastaamaan koneen

vakavointiominaiskäyrää. Käytettäessä määrittelyssä myötäkomponentteja voi suojata toimia oikein myös tilanteissa, joissa virrat ja jännitteet ovat epäsymmetrisiä. [18]

3.5.15 Ylimagnetointisuojaus

Ylimagnetointisuojaan tehtävänä on tunnistaa jännitteen noususta ja/tai taajuuden laskusta johtuva liian korkea magneettivuon tiheys generaattorissa ja muuntajassa, erityisesti voimalaitoksen blokkimuuntajassa.

Tällainen tilanne saattaa syntyä kun voimalaitosblokki putoaa verkosta täydessä kuormassa ja jännitteensäätäjä ei toimi riittävän nopeasti korjatakseen siihen liittyvän jännitteen nousun. Samoin taajuuden eli nopeuden lasku saarikäytössä voi johtaa luvattoman suureen magneettivuon tiheyden kasvuun ja siten aiheuttaa ongelmia muuntajalle

Magneettivuon tiheyden kasvu yli nimellisarvon johtaa nopeasti rautasydämen kyllästymiseen ja suuriin pyörrevirtahäviöihin. Tällöin ovat vaarassa erityisesti verkosta erotetut, mutta generaattoriin kytketyt voimalaitosten blokkimuuntajat.

3.5.16 Yli- ja alitaajuussuojaus

Taajuussuojan tehtävänä on erottaa tahtikone verkosta verkon taajuuden vaihdellessa yli sallittujen rajojen.

Taajuus voi laskea verkon kuormittaessa generaattoria liikaa tai vikaantuneesta taajuus- tai kierrosnopeuden säätäjästä. Alitaajuussuojaa käytetään myös generaattoreissa jotka voivat ajoittain olla saarikäytössä, irrottamaan kone verkosta kun generaattoria pyörittävä käyttövoima poistuu, koska tällöin takatehosuoja ei voi toimia. Generaattori voidaan tällöin erottaa verkosta alitaajuussuojan avulla.

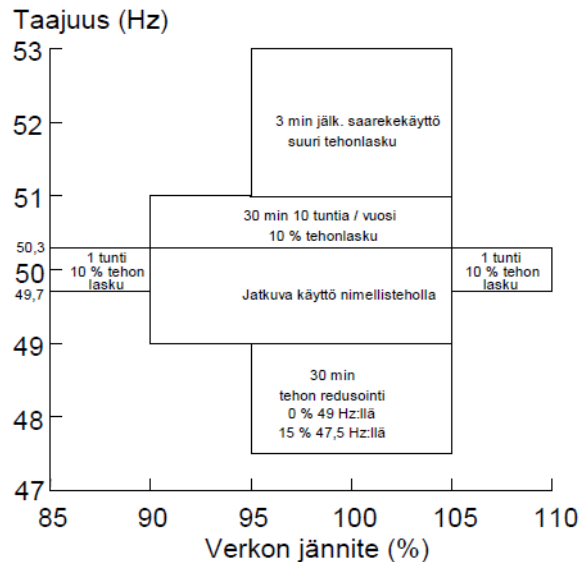
Taajuus voi nousta esim. kuormien pudotessa ja generaattorin joutuessa saarikäyttöön tai johtuen vikaantuneesta taajuudensäätäjästä. Tällöin on vaarana koneen itsemagnetointi, jos se on kytkettynä pitkään tyhjäkäyvään johtoon.

Taajuuden määrittely tapahtuu jännitteiden myötäjärjestelmän avulla. Tarkka taajuuden määrittely suoritetaan mittausjänniteosoittimien myötäkomponenttien kulmanopeuden (todellinen taajuus) suhteessa perustaajuuteen, eli todellisen taajuuden ja perustaajuuden erona. [18]

3.6 Järjestelmän stabiilisuus

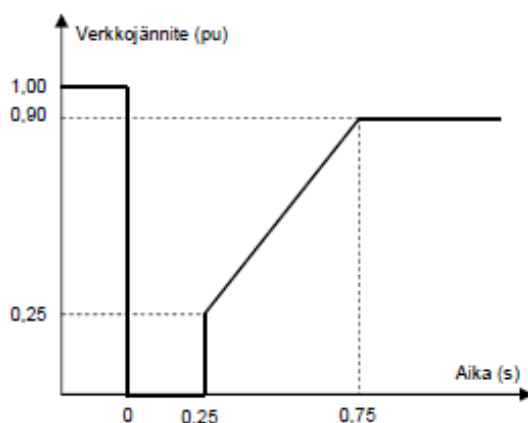
Riippuen energiansiirtoverkon olosuhteista ja syöttävistä generaattoreista, dynaamiset muutokset kuten kuorman pudotukset, jälleenkytkennät, erilaiset kytkentätoimenpiteet tai oikosulut joita ei kytketä pois riittävän nopeasti voivat aiheuttaa tehon heilahtelua. Tällaiset tehonheilahtelut vaarantavat verkon stabiilisuuden. Stabiilisuusongelmat johtuvat usein pätötehon heilahteluista, jotka voivat johtaa jättämän kasvuun ja vaihehyppäykseen tai generaattorin ylikuormittumiseen.

Edellytyksenä on, että voimalaitokset pysyvät verkossa ja toimivat luotettavasti verkkohäiriöiden sattuessa. Muussa tapauksessa häiriö voi laajeta suurhäiriöksi, jolloin voimajärjestelmän toiminnan palauttaminen vaikeutuu ja viivästyy huomattavasti. [19]



Kuva 26 Voimalaitoksen tehontuotannolle asetetut vaatimukset [19]

Voimalaitoksen säätö- ja suojajärjestelmät on suunniteltava siten, etteivät verkon oikosulkujen tai kytkentätilanteiden muutosten synnyttämät hetkelliset taajuusmuutokset aiheuta kyseiseen verkkoon liitetyn voimalaitoksen irtoamista verkosta. 400 kV, 220 kV tai 110 kV jänniteportaaseen liittyvät voimalaitokset omakäyttöineen on suunniteltava siten, että ne kestävät alla kuvatun, viitteellisen verkkojännitteen vaihtelun (syvä jännitekuoppa) irtoamatta verkosta. [19]



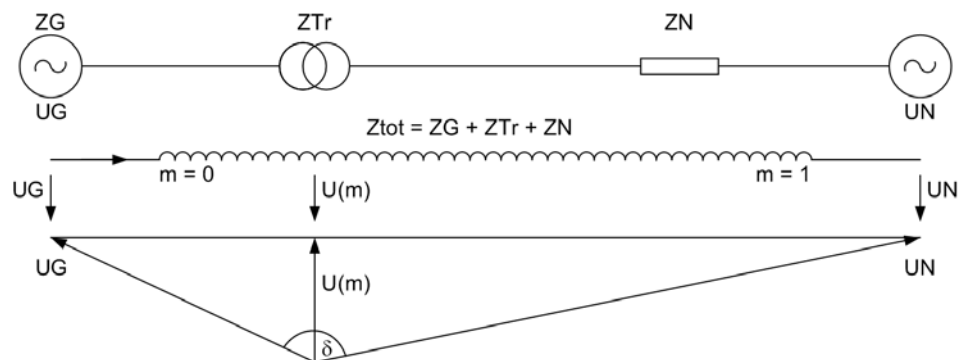
Kuva 27 Vian aiheuttama verkkojännitteen vaihtelu [19]

Kuvassa 27 esitetyn verkkojännitteen vaihtelun kuvaus: Ensin askelmainen 0,25 sekuntia kestävä verkkojännitteen lasku 0 %:iin, sitten 25 %:n askelmuutos ylöspäin. Tämän jälkeen verkkojännitteen lineaarinen nousu 90 %:iin 0,5 sekunnissa, jota seuraa vakio 90 %:n verkkojännite.[19]

Ainoastaan pieni tehon lasku yllämainitun vaihtelun aikana sallitaan. Verkon normaalitila muuttuu häiriötilaksi taajuuden muutosnopeuden ylittäessä arvon $\pm 0,5 \text{ Hz/s}$ tai taajuusvirheen ollessa yli $0,5 \text{ Hz}$ [19]

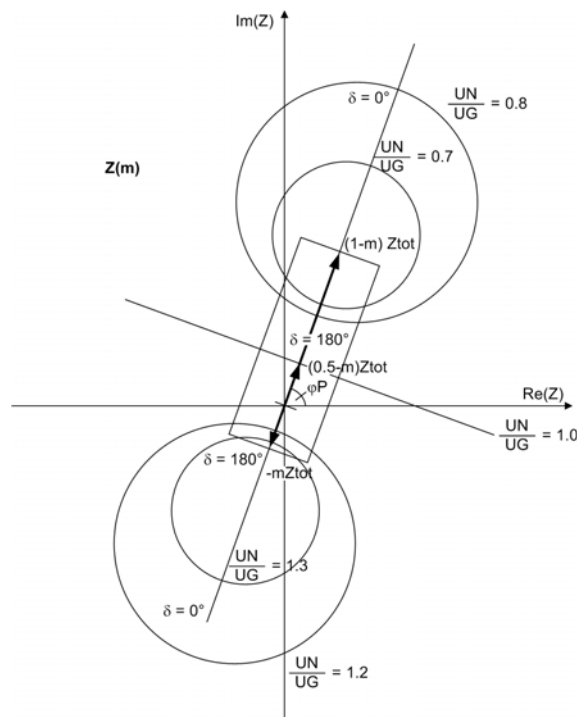
3.7 Epätahtisuojaus

Epätahtisuoja tunnistaa edellisessä kappaleessa 3.6 kuvatun tehonheilahtelun impedanssimittauksen avulla. Suoja valvoo impedanssivektoreiden siirtymää. Impedanssi lasketaan jännitteiden ja virtojen myötäkomponentin avulla. Laukaisusignaali määritellään impedanssivektorin muutosnopeuden ja tehonheilahtelun sähköisen keskipisteen sijainnin avulla. [18]



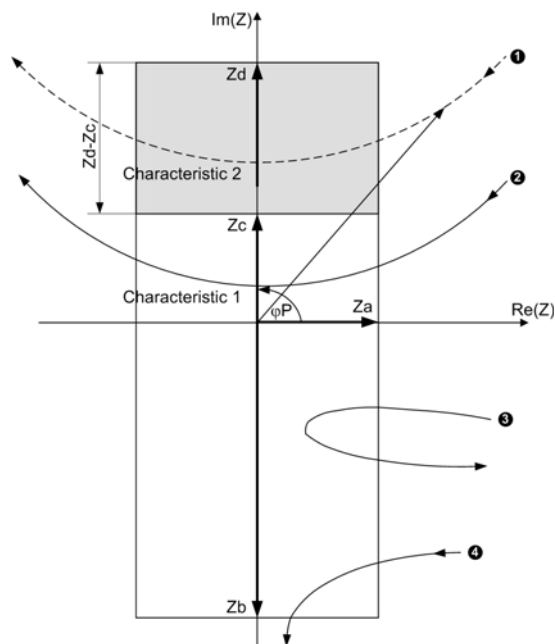
Kuva 28 Tehonheilahtelun ekvivalenttimalli [18]

Epätahtitilanne on esitetty käyttäen yksinkertaista mallia. Oheisessa kuvassa 28 näkyy generaattorijännite U_G ja verkon ekvivalenttijännite U_N . Generaattorin, muuntajan ja verkon impedanssit sijaitsevat näiden kahden jännitteen välissä ja muodostavat kokonaisimpedanssin Z_{tot} . Tarkastellaan tilannetta mittauspisteessä (m).



Kuva 29 Impedanssisuora mittauspisteessä m [18]

Mittauspisteen m impedanssikuvaaja kuvassa 29 on tehonheilahtelumonikulmio, joka on aseteltavissa kaikkiin neljään suuntaan ja kallistuskulmaansa ϕ_P nähden. Näin se on sovellettavissa erilaisiin sähköjärjestelmän olosuhteisiin. [18]



Kuva 30 Monikulmioinen epätahtikoordinaatisto [18]

Kuva 30 esittää tehonheilahtelumonikulmion tarkemmin. Selvyyden vuoksi kallistuskulman oletetaan olevan 90° . Impedanssien Z_a , Z_b , Z_c ja (Z_d-Z_c) asetteluparametrit määrittelevät tehonheilahtelumonikulmion. [18]

Monikulmio on symmetrinen pystyakselinsa suhteen. Z_b mitataan ”taakse”-suuntaan – generaattoriin, Z_c ”eteen”-suuntaan blokkimuuntajalle ja toinen porrass Z_d , ”eteen”-suuntaan sähköverkkoon.

Tehonheilahtelumonikulmio on jaettu kahteen osaan. Kuvaaja 1 [engl. characteristic 1], ei väritetty alue, edustaa alempaa osaa suorakulmiosta. Kuvaaja 2 [engl. characteristic 2] kattaa ylemmän, väritetyn alueen. Riippuen tehonheilahtelun sähköisestä keskipisteestä tai voimalaitoksen läheisyydestä, impedanssivektori kulkee kuvaajan 1 tai kuvaajan 2 läpi. Symmetria- eli imaginääriakselin risteyspiste on määräävä kuvaajan kohdentamiseksi. [18]

Tehonheilahtelut ovat symmetrisiä kolmivaiheisia tapahtumia. Ensimmäinen edellytys on siten mitattujen virtojen symmetria. Tehonheilahtelun ehtona on, että virran myötäjärjestelmäkomponentti ylittää valitun raja-arvon I_2 , kun virran vastajärjestelmäkomponentti pysyy alle asetellun arvon I_1 . [18]

Epätahtitilanteen havaitseminen vaatii lisäksi, että impedanssivektori saapuu tehonheilahtelukoordinaatistoon yhdeltä puolelta, kulkee imaginääriakselin tai koordinaatiston jakolinjan läpi ja poistuu koordinaatistosta vastapäiseltä puolelta (tahtikäytön menetys, tapaukset 1 ja 2) [18]

Tämä määritellään siten, että kompleksisten impedanssien reaalisat (tarkasteltuna ϕ_P :n suhteen käännettyyn koordinaatistoon) ovat muuttaneet merkkiään ylittäessään koordinaatistoa. Toisaalta tehonheilahteluvektori voi myös saapua ja poistua tehonheilahtelumonikulmiosta samalta puolelta. Tässä tapauksessa tehonheilahtelu pyrkii tasapainottumaan (tapaukset 3 ja 4) [18]

Kun epätahtitilanne on tunnistettu eli kun impedanssivektori on kulkenut tehonheilahtelumonikulmion läpi, annetaan merkinanto, joka myös identifioi ylitetyn kuvaajan. Lisäksi laskurin n_1 (kuvaajalle 1) tai n_2 (kuvaajalle 2) arvoa kasvatetaan.

Epätahtisuojaus havahtuu kun laskuri saavuttaa arvon 1. Seuraavat asetellun ajan aikana tulleet epätahti-indikoinnit kasvattavat laskurin arvoa. Samalla tavoin aseteltavan pitoajan jälkeen havahtuma nollautuu. Laukaisukäsky annetaan kun tehonheilahtelumonikulmion ylitysten määrä saavuttaa asetellun arvon. [18]

4 GENERAATTORISUOJAUKSEN UUSINTA

4.1 Perustelut ja reunaehdot generaattorin toisiosuojauksen uusinnalle

Kuten lähteissä [9] ja [20] todetaan, on generaattorin eliniän kannalta erittäin tärkeää analysoida määrävälein suojauksen tilanne ja arvioida tarvittavat toimenpiteet, jotta laitos täyttää toimintatavoitteensa. Etenkin yli 20 vuotta vanhoissa laitoksissa tähän tulisi kiinnittää erityistä huomiota [20].

Vanhan suojauksen heikkouksia verrattuna numeeriseen suojaukseen ovat matalampi herkkyys ja käyttöturvallisuus sekä joidenkin suojaustoimintojen epätarkkuus tai puuttuminen kokonaan [9] [20]. Erityisen riskialttiita yli 20 vuotta vanhat generaattorisuojaukset ovat seuraavilla alueilla: staattorin 100 % maasulkusuojaus, roottorin maasulkusuojaus ja tahaton verkkoon kytkentä [engl. inadvertent energization] [20]

Numeerisen suojauksen edut verrattuna sähkömekaanisiin tai staattisiin suojareleisiin ovat moninaiset. Näitä etuja ovat mm. [21]

- jännitteiden, virtojen, tehojen ja muiden analogiasuureiden mittaus
- häiriötallennin- ja käyttöpäiväkirjatoiminnot
- etäasettelu- ja luentamahdollisuudet erilaisten liikennöintiväylien kautta
- käyttäjän mahdollisuus asettaa laukaisut
- pienempi tilantarve ja pienempi johdotustarve
- pieni virta- ja jännitemuuntajien taakka
- jatkuva itsevalvonta

Vaikka numeerinen suojaus onkin monessa suhteessa luotettavampi kuin vanhemman tyyppiset suojat, on suurille ja tärkeille generaattoreille silti järjestettävä kahdennus tai varasuoja tärkeimpien suojaustoimintojen osalta. [21]

Suojauksen uusinnan yhteydessä on syytä tarkastaa myös suojausasettelut [22] sekä suojauksen, magnetoinnin, jännitteensäätäjän ja generaattorin suorituskyvyn välinen koordinaatio [23]. Näiden osalta kantaverkkoyhtiö on määritellyt rajat verkkoon kytkettävien generaattorien sekä niiden magnetoinnin ja jännitteensäätäjien suorituskyvylle kuten luvussa 3.6 on kerrottu.

4.2 Uusittavan suojauksen kriteerit

Kuten Blackburn [14] on kirjansa alussa hienosti todennut, suojaus on tietoa, taitoa ja taidetta. Sen tärkeimmät kriteerit ovat luotettavuus, selektiivisyys, nopeus, yksinkertaisuus ja taloudellisuus.

Luotettavuudella saavutetaan suojauksen asianmukainen toiminta. Selektiivisyydellä varmistetaan toiminnan jatkuvuuden maksimointi pienimmällä järjestelmän osan erottamisella. Nopeudella taataan vian kestoajan ja siitä johtuvien laitevaurioiden minimointi sekä vältetään järjestelmän joutuminen epästabiiliin tilanteeseen. Yksinkertaisuus merkitsee vähimmäismäärää suojaus- ja apulaitteita sekä johdotusta, jotta saavutetaan suojauksen tavoitteet. Taloudellisuus tarkoittaa maksimisuojausta pienimmillä kokonaiskustannuksilla.[14]

Neljä tekijää, jotka [14] mukaan edellisten lisäksi vaikuttavat suojareleistykseen:

- taloudellisuus
- suojausinsinöörin persoonallisuus ja sähköjärjestelmän ominaisuudet.
- katkaisu ja erotuslaitteiden sijainti ja käytettävyyys
- saatavilla olevat vikatiedot ja -tilastot

Yleisesti ottaen suojauksen pitää olla sovellettavissa eri generaattorityypeille ja voimalaitoksille kuten epätahti-, tahti-, turbo- ja avonapageneraattoreille sekä lämpö-, kaasu-, vesi-, ydin-, tuuli- ja biokaasu voimalaitoksille.

Nyky aikaisten, sekä itsenäisten että yhdistettyjen reaaliaikaisten suojaustoimintojen näihin erilaisiin sovelluksiin täytyy täyttää standardit (IEC, ANSI). Muita vaadittavia ominaisuuksia ovat mm. yksinkertainen erilaisten virtamuuntajatyypien sovitin (1A, 5A) ja joustavat laukaisuratkaisut (laukaisumatriisi, laukaisureleet).

Suojaukselta vaadittavia ominaisuuksia ovat myös korkea herkkyys ja laaja taajuustoiminta-alue suojaustoiminnoille hyvin erityyppisissä sovelluksissa. Näitä ovat esimerkiksi vesivoimalaitokset, pumppuvoimalaitokset ja kaasuturbiinilaitokset, jotka käynnistetään käynnistyskonvertertien avulla. Tähän liittyen voidaan vielä mainita vaadittava korkea herkkyys ja tarkkuus takatehosuojauksessa, erityisesti suurilla lämpövoimalaitoksilla.

Teknisten näkökohtien lisäksi nykyään on tärkeää saavuttaa maksimisuojaus minimikustannuksin. Halvin ratkaisu ei välttämättä ole luotettavin. Lisäksi se saattaa aiheuttaa suurempia haasteita ja vaikeuksia asennuksen ja käytön suhteen samoin kuin korkeampia huoltokustannuksia. [14]

Suojauskustannuksia sanotaan korkeiksi tarkasteltaessa ainoastaan suojauksen hintaa, mutta niitä tulisi tarkastella verrattuna niiden suojaaman paljon arvokkaamman laitteen hintaan sekä tarkoitukseen sopimattoman tai epätäsmällisen suojauksen aiheuttaman käyttökeskeytyksen tai suojattavan laitteen menetyksen kustannuksiin.

Säästäminen suojauksen kustannuksissa voi aiheuttaa monta kertaa saavutetun säästön suuruisen menetyksen vaurioituneen tai tuhoutuneen laitteen korjaus- tai uusimiskustannuksina riittämättömän, puutteellisen tai epätäsmällisen suojauksen vuoksi. [14]

Luvussa 6 on esitetty esimerkkilaskelma virheellisesti toimineen tai toimimatta jääneen suojauksen aiheuttamista kustannuksista sekä suojausuisinnan kustannuksista.

4.3 Uusinnan aikataulutus voimalaitoksen elinkaarella

Uusintatarve voi riippua monista seikoista. Suurin osa näistä johtuu laitteiston ikääntymisestä, jolloin laitteiden toimintavarmuus ei välttämättä ole enää vaadittavalla tasolla tai varaosia ei ehkä ole saatavilla.

Suojauksen uusinta-ajankohdan arviointi riippuu generaattorin oletetusta eliniästä. Mikäli generaattorilla katsotaan olevan käyttöikää jäljellä vielä vuosia, jopa kymmeniä vuosia, voidaan siihen liittyvien toisiolaitteiden uusintaa pitää tarkoituksenmukaisena. Luonnollista on että jos koko generaattori uusitaan, toisiojärjestelmät ja suojaus uusitaan samanaikaisesti.

Tyypillisesti voimalaitoksilla on lyhyitä huoltoseisokkeja vuosittain ja pidempiä harvemmin, esimerkiksi joka toinen vuosi. Tänä aikana tarkastetaan ja huolletaan laitteita, sekä vaihdetaan kuluvia osia uusiin.

Voimalaitokselle on usein tehty kunnossapitosuunnitelma, joka koostuu eri laitevalmistajien ohjeista ja niiden pohjalta laaditusta laitekohtaisesta huoltosuunnitelmasta. Näiden perusteella määritetään huoltoseisokkien väli. Kunnossapito-organisaatio sopii laitoksen omistajan ja tuotanto-organisaation kanssa tarvittavien huoltoseisokkien ajankohdasta ja kestosta siten, että siitä olisi mahdollisimman vähän haittaa tuotannolle. Suomessa huoltoseisokit pyritään sijoittamaan kesäaikaan, koska silloin sähkön ja lämmön tarve on vähäisin.

Koska toteutusajankohdat on lyöty lukkoon seisokkiaikataulussa, on tärkeää että uusinnan suunnittelu aloitetaan hyvissä ajoin, jolloin toteutus on mahdollista tehdä annettuna aikana. Samalla kun laitos seisoo, kannattaa huolto- ja uusintatöitä tehdä mahdollisimman paljon, jotta laitosta ei tarvitse heti pysäyttää uudestaan. Mahdollisimman laajan uusinnan teko on suositeltavaa, jotta laitoksen luotettavuus saadaan pidettyä korkealla tasolla.

4.4 Uusinnan laajuuden määrittely

Uusinta voidaan tehdä eri laajuisena, riippuen käytettävissä olevasta ajasta sekä investointiin varatusta rahoituksesta. Joskus pelkän suojausalueen uusinta riittää, mutta usein halutaan varmistua koko järjestelmän luotettavuudesta, jolloin kyseessä on suurempi kokonaisuus.

Osittaisesta suojauksen uusinnasta tai oikeastaan laajennuksesta voidaan puhua myös silloin, kun vanhaan generaattoriin halutaan lisätä uusia suojaustoimintoja. Tällainen tilanne saattaa muodostua kun halutaan 90% staattorin maasulkusuojauksen tilalle 100% maasulkusuojaus tai roottorin maasulkusuojausmenetelmää halutaan muuttaa. Tällöin suojausalue itsessään saattaa pysyä samana, mutta lisälaitteita tarvitaan.

4.4.1 Mittamuuntajat

Uusintaa suunniteltaessa saattaa olla syytä miettiä myös virta- ja jännitemuuntajien ominaisuuksia sekä niiden määrää ja sijoittelua. Tyypillisesti mittamuuntajien elinikä on samaa luokkaa generaattorin eliniän kanssa, joten niitä ei suojausuosinnon yhteydessä yleensä vaihdeta. Tällöin niiden soveltuvuus uudelle suojaukselle tulee varmistaa. Vanhojen mittamuuntajien osalta erityistä tarkastelua vaatii niiden tarkkuuden riittävyys uusille suojarileille. Tämä on tarvittaessa todennettava laskelmin.

Mittamuuntajien ja niiden erityyppisten käämitysten riittävä määrä on varmistettava suojausta uusittaessa ja mahdollisesti laajennettaessa. Tämä on tärkeää erityisesti silloin kun tarvitaan kahdennuksia. Myös mittamuuntajien elinikä on syytä ottaa huomioon. Mikäli vanhat mittamuuntajat alkavat olla elinkaarensa päässä, on ne syytä uusia samanaikaisesti suojauksen kanssa.

Vanhoissa laitoksissa on myös voitu toteuttaa erilaisia ratkaisuja kuin mitä nykypäivänä yleisesti käytetään. Esimerkiksi jännitemittaus on saatettu toteuttaa kaksivaiheisena kustannussäästösyistä. Nykyiset numeeriset suojat voidaan kytkeä myös kolmivaihemittauksesta poikkeaviin ratkaisuihin, mutta mittaustarkkuus ja täten suojan toimintatarkkuus on aina sitä parempi, mitä lähempänä symmetristä kolmivaihejärjestelmää ollaan.

4.4.2 Komponentti

Kyseessä voi olla yksittäisen suojarileen tai siihen liittyvän komponentin uusinta esimerkiksi silloin, kun vanha on rikkoutunut eikä varaosia enää saa.

Uusinta tulee ajankohtaiseksi myös silloin kun laitteen käyttöikä alkaa olla lopussa, eikä sen luotettavuudesta voida olla enää varmoja. Laite saattaa esimerkiksi sisältää komponentteja jotka vanhenevat, vaikkapa kondensaattoreita jotka kuivuvat ajan kuluessa. Samalla tavoin ikääntymisen tuoma käytettävyyden lasku aiheuttaa uusintatarvetta. Laitetta täytyy esimerkiksi testata tai huoltaa usein tai sen asennukset ja säädöt eivät pysy ”kohdallaan”.

Pelkkää suojarilettä uusittaessa kaapelointi pysyy yleensä samana sekä kenttälaitteille että automaatiojärjestelmään.

4.4.3 Suojauskaappi

Jos suojaus on päätetty uusia osittain, saattaa kysymykseen tulla suojauskaapin uusiminen. Toisiokaapelointi ja kenttäkaapelointi mittamuuntajille ja toimilaitteille pysyy samana. Liitännät automaatiojärjestelmään saattavat muuttua.

Tyypillisesti vanhoissa järjestelmissä suojarileet ovat vienneet paljon tilaa, samoin erilaiset apureleet, joita on käytetty johdotettujen signaalien välittämiseen laitteelta toiselle. Tavallista on, että toiminnot, jotka ovat aikaisemmin vaatineet kaksi

suojauskaappia, mahtuvat nykyisellä numeerisella tekniikalla toteutettuna yhteen kaappiin.

Myös koko suojausta uusittaessa on usein tarkoituksenmukaisempaa uusia koko kaappi kuin kaikki komponentit erikseen kaappien sisällä.

4.4.4 Kaapelit

Kenttäkaapelointia ei yleensä uusita muulloin kuin kaikkien mittamuuntajien tai muiden kenttälaitteiden uusinnan yhteydessä. Yksittäisen laitteen vaihdon tai uusinnan kohdalla pyritään mahdollisuuksien mukaan käyttämään olemassa olevaa kaapelointia. Tällöin vanhojen kaapeleiden soveltuvuus on tarvittaessa todennettava laskelmin.

Mikäli laitteiden sähköiset arvot muuttuvat oleellisesti, täytyy kaapelit uusia. Samoin mikäli laitteista otetaan uusia toimintoja esim. apukoskettimia käyttöön eikä vanhan kaapelin johdinmäärä riitä, täytyy vanha kaapeli korvata uudella tai lisätä uusi kaapeli vanhan rinnalle.

Sen sijaan automaatiojärjestelmäliitynnät voidaan hyvin uusia, vaikka muut kaapelit säilytettäisiinkin, koska nykyisillä laitteilla esim. valokuidulla tai kupariväylällä saadaan paljon enemmän informaatiota siirrettyä yhdellä kaapelilla paikasta toiseen kuin vanhalla I/O-kaapeloinnilla.

4.4.5 Koko suojausjärjestelmä

Koko suojausjärjestelmään uusiminen tulee kyseeseen silloin, kun alkuperäinen laitteisto alkaa ikääntyä ja halutaan varmistua luotettavuuden ja käytettävyyden säilymisestä vähintään samalla tasolla kuin se oli laitoksen valmistuessa. Tällöin on myös hyvä tarkastella uudelleen tarvittava kokonaisuus suojauksen osalta. Esimerkiksi seuraavia kysymyksiä on syytä pohtia uusintaa suunniteltaessa:

- Voidaanko useampi vanha suoja korvata yhdellä uudemmallalla, joka sisältää samat toiminnot?
- Voidaanko joitakin vanhoja suojaustoimintoja jättää kokonaan pois tai korvata toisentyypisillä suojauksilla?
- Tarvitaanko uusia suojaustoimintoja?
- Tarvitaanko redundanttisuutta?
- Halutaanko kokonaan kahdennettu järjestelmä, jolloin myös mittamuuntajat ovat kahdennettuja vai riittääkö osittainen kahdennus, jolloin eri suojat voivat käyttää osittain samoja mittamuuntajia?

Lisää kokonaisen suojauksen uusintaan liittyviä vaiheita ja kysymyksiä on esitetty liitteessä E.

5 LIITYNNÄT MUIHIN JÄRJESTELMIIN

5.1 Liitynnät muihin järjestelmiin

Voimalaitosautomaatio on voitu toteuttaa kokonaan integroituna järjestelmänä, jolloin kaikki laitteet, mukaan lukien sähkönjakelu ja kytkinkenttä, on liitetty samaan järjestelmään. Vaihtoehtoisesti eri päälaitteiden tai osakokonaisuuksien mukana tulleita järjestelmiä saattaa olla useampi, jotka on puolestaan liitetty yhteen pääjärjestelmään.

Liitynnät pääjärjestelmään voidaan tehdä erilaisia väyläratkaisuja hyödyntäen tai vanhimmissa ja yksinkertaisimmissa laitteissa perinteistä I/O-signaalointia käyttäen.

Pienissä voimalaitoksissa, automaatiojärjestelmiä on usein vain yksi, kun taas suurilla voimalaitoksilla, kuten esimerkiksi ydinvoimaloissa on tavallisesti prosessiautomaatiojärjestelmä ja sähkönjakelua valvova järjestelmä erikseen kuitenkin niin, että keskijännitejakeluun liitetyt prosessilaitteet ohjataan prosessiautomaatiosta (esim. 6kV:n moottorit).

Suojareleet voidaan liittää pääautomaatiojärjestelmään erilaisia väyläratkaisuja hyväksikäyttäen joko suoraan tai erilaisten muuntimien välityksellä. Tällaisessa ratkaisussa automaatiojärjestelmä toimii tyypillisesti isäntänä ja suojareleet orjina, jotka ottavat käskyt ja kyselyt vastaan automaatiosta, mutta eivät pysty suoraan kommunikoimaan keskenään. Esimerkki tästä on esitetty kuvassa 31.

Nykyisissä numeerisissa suojareleissä on olemassa myös tyypillisesti valmistajakohtainen huoltoväyläliityntä, jonka avulla voidaan erilaisia tapahtuma- ja historiatietoja kerätä ja siirtää muiden järjestelmien käyttöön. Myös tämä on esitetty kuvassa 31.

Nykyisin on mahdollista liittää releet toisiinsa myös IEC 61850 –protokollaa hyödyntäen, jolloin laitteet kommunikoivat suoraan keskenään. Käytettäessä IEC 61850 -protokollaa, ei erillistä huoltoväylää tarvita, vaan samalla fyysisellä yhteydellä voidaan hoitaa sekä normaali operointiväylä- että huoltoväyläliikennöinti. Tästä on esitetty esimerkki kappaleessa 7 kuvassa 37.

5.2 Uusinnassa mietittävää liikennöinnin kannalta

Suojaus uusinta voidaan toteuttaa samanaikaisesti voimalaitosautomaatiouusinnan ja muiden toisiolaitteiden uusinnan kanssa. Tällöin liityntärajapinnat ovat selkeät ja toimiva kokonaisuus on helposti määritettävissä.

Jos voimalaitosautomaation uusintaa ei tehdä samaan aikaan suojaus uusinnan kanssa, on hyvä kuitenkin varautua myöhemmin tapahtuvan automaatiouusinnan vaatimiin muutoksiin laitteiden välisessä kommunikoinnissa. Vanhat suojaus- ja

magnetointijärjestelmät on saatettu liittää automaatioon I/O-tasolla, jolloin liitettäessä uudet suojaukset vanhaan automaatioon tämä tulee huomioida uusien suojareleiden I/O-liityntöjen määrässä. Kun automaatio sitten uusitaan, voidaan siirtyä käyttämään erilaisia väyläratkaisuja, joiden tarpeet tulisi myös ottaa huomioon jo suojareleitä hankittaessa. Tällaisia ovat esimerkiksi I/O-liityntöjen korvaaminen valokuituyhteydellä ja jollakin yleisellä liikennöinti-protokollalla.

Suojausta uusittaessa ei välttämättä ole vielä tiedossa uuden automaatiojärjestelmän liityntämahdollisuudet. Tällöin on syytä jo hankintavaiheessa selvittää liikennöintitavan muutosmahdollisuudet suojareleissä. Voidaanko uusien releiden väylätyyppi ja protokolla muuttaa tarvittaessa helposti vai täytyykö koko rele vaihtaa?

Myös kommunikaatioväylän valintaan on syytä kiinnittää huomiota. Toisilaitteidenhan pitäisi pystyä kommunikoimaan vielä 20 vuoden päästä käytössä olevien järjestelmien kanssa. Onko kyseessä valmistajakohtainen, suljettu liikennöinti-protokolla, johon liityttäessä tulee kaikkien laitteiden olla samalta valmistajalta vai standardoitu, avoin kommunikaatiomuoto, jota kehitetään jatkuvasti ja johon todennäköisesti on tukea ja laitteita saatavissa vielä 20 vuodenkin kuluttua?

5.3 Numeeristen suojien kommunikointimahdollisuudet

Sähkölaitosmaailmassa on käytössä sekä avoimien standardien mukaisia liikennöinti-protokollia että yhä harvenevassa määrin valmistajakohtaisia suljettuja väyliä ja protokollia. Seuraavassa tarkastellaan lyhyesti muutaman yleisimmän avoimen kommunikointiväyläratkaisun ominaisuuksia voimalaitosympäristössä.

5.3.1 IEC-60870-5-103

IEC-60870-5-103 –protokollalla toteutettu väylä on avoin, standardin määrittelemä suojauskommunikointiin tarkoitettu releväylä. Voimalaitosautomaatioon liitytään protokollamuuntimena toimivan ala-aseman välityksellä siten, että automaatioliityntä toteutetaan joko sarjaliikenneväylänä liikennöinti-protokollaa IEC 60870-5-101 käyttäen tai ethernet-liityntäisellä IEC 60870-5-104 –protokollalla kuvan 31 mukaisesti. Tällöin suojarele lähettää viestinsä isäntänä toimivalle protokollamuuntimelle ja sitä kautta automaatiojärjestelmälle aikaleimattuna, jolloin tapahtumajärjestyksen selvitys ja häiriöselvityksen teko on yksiselitteistä ja selkeää. Tapahtumakysely releiltä toimii sekä syklisesti että spontaanisti. Releiden aikatahdistus voidaan suorittaa protokollan avulla ala-asemasta ja tiedonsiirron liikennöinti-nopeus on 4800...38400 baudia. [18]

IEC 60870-5-103 protokolla on selkeä isäntä-orja -kommunikointiin perustuva liikennöinti-protokolla, jossa ala-asema toimii isäntänä ja lähettää kyselyt orjina toimiville suojareleille. Releet eivät suoraan pysty kommunikoimaan toistensa kanssa.

5.3.2 IEC 61850

IEC61850 on avoin, standardin määrittelemä kommunikointiprotokolla joka toimii ethernet-verkossa. Luontevin tapa liittyä voimalaitosautomaatioon on ethernet-verkon kautta protokollamuuntimena toimivan ala-aseman välityksellä IEC 60870-5-104 protokollaa käyttäen. Tästä on esitetty esimerkki kappaleessa 7 kuvassa 37. Releiden aikatahdistus ala-asemasta onnistuu protokollan avulla ja liikennöintinopeus on maksimissaan 100Mbaudia. Tapahtumakysely releiltä toimii sekä syklisesti että spontaanisti. [18]

IEC 61850 toimii täysin asiakas-palvelija -tyyppisenä liikennöintinä, jolloin kenttälaitteet pystyvät suoraan kommunikoimaan toistensa kanssa. Toistaiseksi sitä on käytetty lähinnä releiden väliseen sekä releiden ja ala-aseman väliseen kommunikointiin rele- ja asemaväylätasoilla.

Sen hyötyinä voidaan pitää releiden mahdollisuutta kommunikoida suoraan toistensa kanssa siten, että esim. kenttien väliset lukitustiedot ovat kaikkien releiden käytettävissä vaikka ala-asema ei olisikaan toiminnassa tai siinä olisi jotakin vikaa.

Standardi mahdollistaisi IEC 61850 -protokollan käytön myös kenttälaitteiden, kuten mittamuuntajien ja releiden välisenä kenttäväylänä. Tästä ei kuitenkaan toistaiseksi ole kuin pilottiprojektikokemuksia, joissa on havaittu ongelmia mm. mittausten tarkkuuden ja digitalisoitujen signaaleiden aikaleimausvaatimusten kanssa [24]. Näihin asioihin tullaan tulevana vuosina kiinnittämään huomiota erilaisten kansainvälisten kehityshankkeiden muodossa [25].

5.3.3 Profibus-DP

Profibus-DP:n avulla releet saa liitettyä suoraan voimalaitosautomaatioon, mutta koska liikennöintiprotokollasta puuttuu sovellustaso, ei suojareleen tekemä signaalien aikaleimaus yksikäsitteisesti siirry eteenpäin. Tapahtumakyselyt releiltä toimivat ainoastaan syklisesti. Releiden aikatahdistusta ei myöskään saa tehtyä protokollan avulla ala-asemasta. [10]

5.3.4 DNP3.0

DNP3.0 –protokolla sisältää aikaleimauksen, mutta esimerkiksi häiriöntallennus ei väylän kautta onnistu ja suurin mahdollinen tiedonsiirtonopeus on 19200 baudia. Tapahtumakysely releiltä toimii sekä syklisesti että spontaanisti. [18]

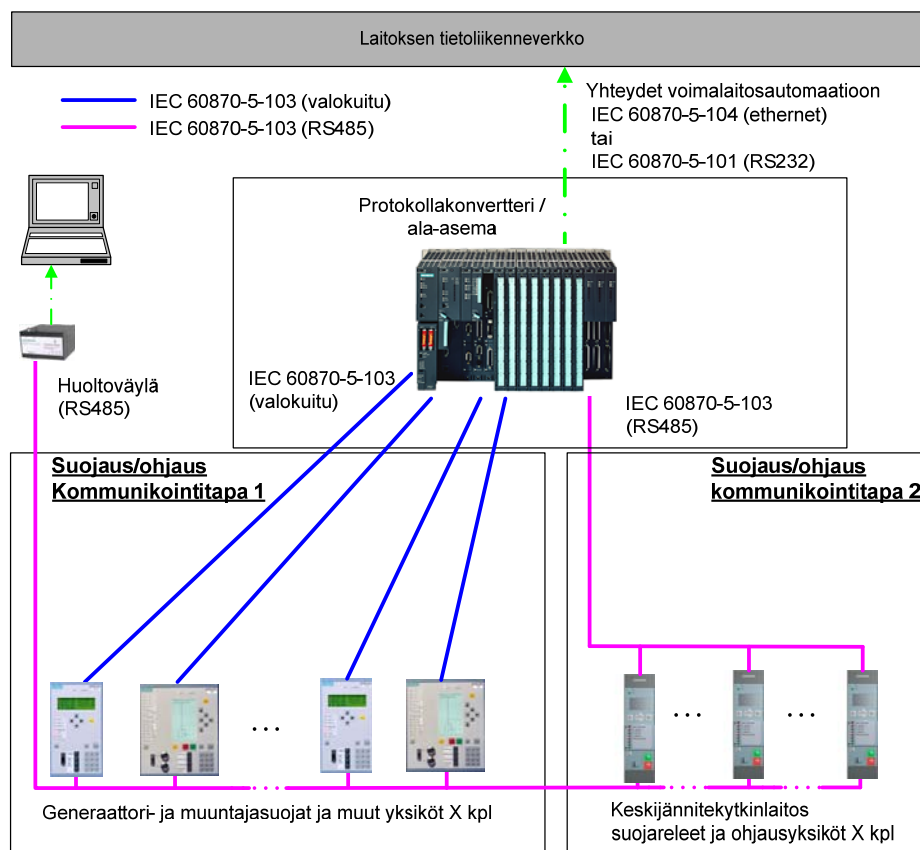
5.3.5 Modbus

Modbus- protokolla ei sisällä aikaleimausta ja viestien lähetystapa on ainoastaan syklinen kysely, tiedonsiirtonopeus korkeintaan 19200 baudia. [18]

5.4 Yhteenveto kommunikointiväylistä

Kaikissa edellä mainituissa kommunikointiväylissä voi fyysisenä mediana olla joko kuparikaapelilla tai valokuidulla toteutettu ethernet-verkko tai kuparikaapelilla tai valokuidulla toteutettu sarjaliikenneväylä esim. RS485.

Yleisesti voidaan todeta, että vaikka releväylän saisi liitettyä suoraan automaatioon, on tarkoituksenmukaisempaa pitää väylät erillään siten, että releväylän ja automaatiotähtäimen väliin asennetaan protokollamuunnin. Tämä varmistaa sen, että jos laitosautomaatiotähtäimessä on ongelmia, pystyy releväylä kuitenkin toimimaan normaalisti.



Kuva 31 Esimerkki IEC 60870-5-103 releväylätoteutuksesta

6 TALOUDELLINEN TARKASTELU

6.1 Suojauksen merkitys

Suojausta voisi verrata vakuutukseen. Jos mitään ei satu, ei sen olemassaoloa edes huomaa. Vasta vahingon sattuessa suojaus todentaa tarpeellisuutensa ja sen hyödyt voidaan laskea lyhentyneinä tai kokonaan puuttuvina korjauskustannuksina. Jos taas suojaus ei ole asianmukaisessa kunnossa, voivat vahingot nousta mittaviksi generaattorin ja mahdollisesti turbiininkin vaurioituessa.

Epäasianmukaisesti suojatussa generaattorissa tapahtuneen vian kokonaiskustannukset voidaan laskea paitsi laitteiden suorista korjauskustannuksista, myös toimittamatta jääneen sähkön arvosta sekä toimittamatta jääneen sähkön tilalle muualta ostetun sähkön kustannuksista. Tämän lisäksi voimalaitoksissa, jotka syöttävät kaukolämpöverkkoa tai teollisuutta, myös lämmön jakelu keskeytyy tai vähenee.

Yksinkertaistettuna esimerkkinä voidaan ottaa kaupunkilaitos, arkipäivä tammikuussa, jolloin lämmityskausi on menossa ja sähkön sekä lämmön kulutus huipussaan. Kokonaisuutena vian aiheuttamien kustannusten tarkastelu muodostuu taulukon 2 mukaisista osista.

Taulukko 2 Generaattorivian vaikutukset

Suorat vaikutukset ja kustannukset

Vauriot generaattorille	Korjaushinta generaattorille	Korjausaika generaattorille
Vauriot turbiinille	Korjaushinta turbiinille	Korjausaika turbiinille
Vauriot muille laitteille	Korjaushinta muille laitteille	Korjausaika muille laitteille

Epäsuorat vaikutukset ja kustannukset

Tyypillinen sähkönkulutus alueella	Sähkön myyntihinta/MWh Toimittamatta jääneen sähkön kustannukset	Toimittamatta jääneen sähkön tilalle ostetun (tai muulla tavoin tuotetun) sähkön kustannukset
Tyypillinen lämmönkulutus alueella	Lämmön myyntihinta/MW Toimittamatta jääneen lämmön kustannukset	Toimittamatta jääneen lämmön tilalle ostetun (tai muulla tavoin tuotetun) lämmön kustannukset

6.2 Suojauksen uusimisen kustannukset

Suojauksen uusimisen kustannuksia voidaan tarkastella seuraavasti:

Esimerkkinä käytetään tapausta, jossa kyseessä on noin 20 vuotta vanha laitos ja 150 MVA höyryturbiini, johon liitetyn generaattorin sähköntuotanto on keskimäärin 140 MW.

Laitteista uusitaan generaattorin sekä blokki- ja omakäyttömuuntajien suojauskaapit ja tähtipistemuuntaja, vanhat mittamuuntajat ja kenttälaitekaapelointi säilytetään.

Generaattorisuojareleiden on ajateltu sisältävän kaikki kappaleessa 3.5 taulukossa 1 esitetyt toiminnot. Muuntajasuojauksen osalta laitteiden määrää ei ole tarkasti rajattu, vaan mikä tahansa luvussa 7 esitetystä kolmesta vaihtoehdosta on mahdollinen. Roottorin maasulkusuojauksen tarvitsemat lisälaitteet on laskettu mukaan generaattorisuojauskaappiin.

Laitteet, suunnittelu ja käyttöönotto on huomioitu, samoin asennus. Projektinhoitoa ei ole huomioitu.

Tähtipistekaappi sisältäen staattorin maasulkusuojauksen 20Hz:n syöttölaitteet:

Laitteet: n.30 000 Euroa,

Asennus: n.5000 euroa

Suunnittelu ja käyttöönotto n. 15 000 euroa

Yhteensä: n.50 000 euroa

Generaattorisuojauskaappi laitteineen sisältäen pää- ja varasuojan:

Laitteet: n.32 000 euroa

Asennus: n.5000 euroa

Suunnittelu ja käyttöönotto: n.40 000 euroa

Yhteensä: n.77 000 euroa

Blokkimuuntajan ja omakäyttömuuntajan suojauskaappi laitteineen:

Oletetaan laajuudeltaan samaksi kuin generaattorisuojauskaappi: 77 000 euroa

Kaikki yhteensä: 204 000 euroa

6.3 Pörssistä ostetun sähkön kustannukset

Jatketaan tarkastelua vian vuoksi tuottamatta jääneen sähkön tilalle pörssistä ostetun sähkön kustannusten laskennalla. Tarkastelujaksoksi on valittu liitteenä F olevan Ilmatieteen Laitoksen tammikuun 2009 lämpötilatilaston lämpimin ajankohta [26]. Kyseessä ei siis ole kylmän lämpötilan aiheuttaman sähköntarpeen kannalta pahin mahdollinen tilanne.

Taulukko 3 Sähkön pörssihinta Suomessa tammikuussa 2009 (euroa/MWh) [27]

Tammikuu 2009		Koneen teho 140 MW			
Päivämäärä	Järjestelmä/SYS	Suomi/FI	Ruotsi/SE	Euroa/tunti	Euroa/vrk
18.1.2009	37,91	38,03	38,03	5324,2	127780,8
17.1.2009	40,09	40,06	40,06	5608,4	134601,6
16.1.2009	42,34	43,88	43,88	6143,2	147436,8
15.1.2009	45,55	46,71	46,71	6539,4	156945,6
14.1.2009	42,53	42,61	42,61	5965,4	143169,6
13.1.2009	40,24	40,05	40,05	5607	134568
12.1.2009	39,05	38,65	38,65	5411	129864
11.1.2009	37,69	35,99	36,11	5038,6	120926,4
10.1.2009	40,97	40,86	40,86	5720,4	137289,6

Lasketaan kustannukset tarkastelujakson alimmalla pörssihinnalla, 35,99 euroa / MWh, josta saadaan ko. koneen teho huomioiden 5038,60 euroa/ tunti. Investointikustannusten ollessa aiemmin mainitut 204 000 euroa, tulee kyseisen kohteen takaisinmaksuajaksi 40,5 tuntia.

Yllä olevan esimerkin pohjalta voidaan todeta, että jo pelkästään pörssistä ostetun sähkön kustannukset ovat sitä luokkaa, että suojausuusinta maksaa itsensä takaisin hieman alle kahdessa vuorokaudessa.

Mikäli tähän vielä lisättäisiin mahdollisten vian aiheuttamien vaurioiden korjauskustannukset, olisivat kokonaiskustannukset niin suuret, että tämän perusteella voidaan selkeästi todeta suojauksen uusimisen olevan kannattavaa

7 VUOSAARI A-VOIMALAITOKSEN GENERAATTORI-SUOJAUSUUSINTA

7.1 Yleistä

7.1.1 Vuosaaren voimalaitos

Vuosaaren voimalaitos on Helsingin Energian omistama ja se sijaitsee Helsingin kaupungin alueella, toimittaen sähköä valtakunnan verkkoon ja kaukolämpöä lähialueille. Vuosaaren voimalaitoksella on kaksi voimalaitosyksikköä, Vuosaari A ja Vuosaari B. Kumpikin yksikkö koostuu kahdesta kaasuturbiinista sekä jätelämpökattilasta, höyryturbiinista ja kaukolämmön lämmönvaihtimista.

Vuosaari A on otettu käyttöön vuonna 1991 ja sen generaattorien tehot ovat VuA1:70MVA, VuA2:70MVA ja VuA3:50MVA. Vuosaari A:n pääkaavio löytyy liitteestä G. Vuosaari B on otettu käyttöön vuonna 1998 ja sen generaattorien tehot ovat VuB1:190MVA, VuB2:190MVA ja VuB3:200MVA. [28]

Laitoksen käyttötapa on Vuosaari B:n osalta jatkuvatoiminen peruskuormakäyttö täydellä teholla ja Vuosaari A:n osalta jatkuvatoiminen peruskuormakäyttö täydellä tai vajaalla teholla. Vuosaari A:ta käytetään tarpeen mukaan, riippuen tarvittavan kaukolämmön määrästä ja sähkön hinnasta, täydentämään Vuosaari B:n tuotantoa.

7.1.2 Selvityksen lähtötilanne

Selvityksen tarkoituksena on määritellä tarvittavat laitteet ja ratkaisumallit Vuosaari A:n generaattorisuojauksen uusintaan, joka toteutetaan vuonna 2012. Tarkastelun lähtökohdana on suojauksen uusinta uuden tai nykyaikaisen kaasuturbiinilaitoksen tasolle.

Pääsääntöisesti tarkastelun kohteena on kaasuturbiini A1:n generaattoriblokki, mutta tarkastelu soveltuu sellaisenaan myös samanlaiselle kaasuturbiini A2:n generaattoriblokille. Höyryturbiinigenaattorijärjestelmä A3 on rakenteeltaan erilainen, mutta soveltuvien osien valittua suojausratkaisua voidaan käyttää myös siellä. Suurimpina eroina generaattoriblokkeihin A1 ja A2 ovat tähtipisteen maadoitustapa sekä generaattorikatkaisijan ja omakäyttömuuntajan puuttuminen. Laitoksen pääkaavio on liitteenä G.

Valittujen suojaustoimintojen osalta käydään läpi pääperiaatteet ja vaativampien ratkaisujen osalta myös tarkempi kuvaus sekä muut mahdollisesti huomioon otettavat seikat. Koska kyseessä on blokkikytkentäinen generaattori, ovat päämuuntajan ja omakäyttömuuntajan suojaus olennainen osa laitoksen suojausta. Tarkasteltavaksi alueeksi on näin ollen rajattu generaattori, päämuuntaja ja omakäyttömuuntaja siten, että verkkokatkaisija kuuluu alueeseen mutta omakäyttökiskon syöttökatkaisija ei enää kuulu.

7.1.3 Suojaustarkastelu

Alkuperäinen suojaus on Strömbergin SPA-sarjan sekä ASEAn staattisilla suojareleillä toteutettu ratkaisu vuonna 1990, jolloin laitos on rakennettu. Käytössä ovat olleet liitteessä H esitetyn vanhan suojauskaavion mukaiset suojaustoiminnot, joiden lisäksi toisiovirtapiireissä on käytetty välivirtamuuntajia ja laukaisupiireissä laukaisumatriisia.

Uuden suojauksen määrittelyyn on käytetty pääsääntöisesti SIEMENS AG:n laitteita. Mikäli tästä on poikkeuksia, on laitevalmistajan nimi erikseen mainittu.

Koska suojareleiden kanssa samoihin kaappeihin on sijoitettu tai samoihin virta- ja jännitepiireihin on liitetty muitakin laitteita kuten omakäyttömuuntajan jänniteensäätäjää, tulee myös näihin laitteisiin kohdistuvat muutokset tai mahdollinen uusinta ottaa huomioon suojauskaappeja uusittaessa.

Kappaleen 3.5 taulukossa 1 on esitetty erikokoisille generaattoreille suositeltavia suojaustoimintoja, tämä on ollut pohjana suojaustoimintojen valinnassa. Myös muilla laitoksilla käytössä olevat menetelmät (Olkiluoto, Vuosaari B, Loviisa) ovat tuoneet näkemystä suojauksen toteutuksesta. Samoin keskustelut laitoksen kunnossapitohenkilöstön ja useiden suojausasiantuntijoiden kanssa ovat olleet apuna kokonaisuutta laadittaessa.

Mukaan on otettu muitakin kuin kappaleessa 3.5, taulukossa 1 mainittuja suojaustoimintoja. Näitä on käsitelty kappaleissa 7.4.1, 7.4.2 ja 7.4.3, samoin kuin muutoksia ja lisäyksiä verrattuna vanhaan suojaukseen.

Osa muutoksista johtuu siitä että kyseessä on kaasuturbiinilaitos, joka käynnistetään erillisellä käynnistyskonvertterilla, jolloin generaattori toimii käynnistyksen ajan moottorina. Myös joidenkin apulaitteiden, kuten käynnistyskonvertterin, suojaus on huomioitu vaikka sitä syöttävän muuntajan suojaus on jätetty tarkastelun ulkopuolelle.

Magnetointimuuntajan ylivirtasuojaus ja roottorin ylikuormitussuojaus on aiemmin hoidettu samalla suojalla virtamittauksen ollessa näille kahdelle toiminnolle yhteinen. Tältä osin suojaus voidaan ajatella pidettävän samanlaisena ja tarkoitusta varten oleva suoja sijoitetaan magnetointimuuntajaa syöttävään kojeistoon. Näin ollen se jää varsinaisen generaattorisuojauksen ulkopuolelle.

Oman haasteensa suojauksen suunnitteluun tuo laukaisujen vienti verkkokatkaisijalle, joka sijaitsee sähköasemalla 500 metrin päässä itse voimalaitoksesta. Tällä hetkellä tarkoitukseen käytetään normaalia kuparikaapelia ja erikoistehokkaita laukaisureleitä, jotka ovat tunnettomia pitkään kaapeliin indusoituville jännitteille. Varayhteytenä toimii äänitaajuuslaittein toteutettu yhteys.

Tässä uusintaehdotuksessa yhteys toteutetaan käyttämällä valokuituyhteyttä voimalaitoksen ja sähköaseman välillä. Valokuituyhteyden käyttö vaatii erityisen signaalimuuntimen yhteyden molempiin päihin, jolla signaali saadaan muutettua sähköisestä valoksi ja taas toisin päin.

7.2 Mittamuuntajat

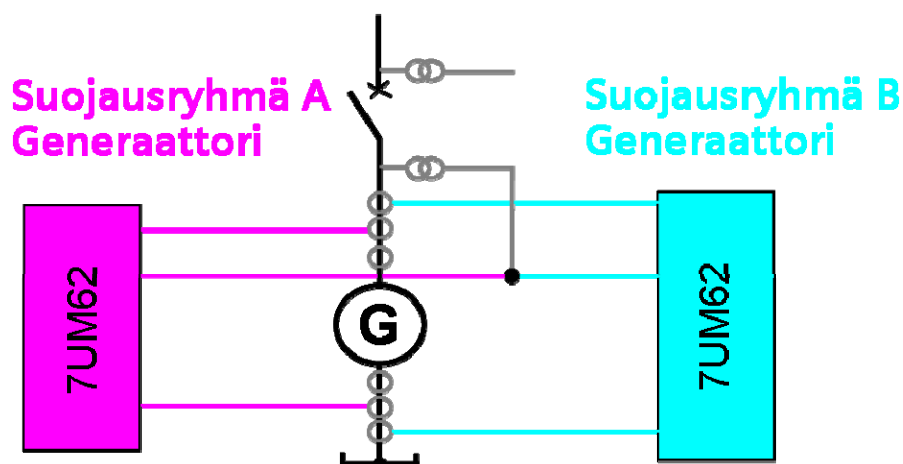
Päämuuntajan yläjännitepuolen virtamuuntajilla on käytössä kaksi suojauskäämiä, joista toinen on muuntajan erovirtasuojaukselle ja toinen 110kV:n kojeiston syöttökentän ylivirta- ja maasulkusuojaukselle.

Omakäyttömuuntajan alajännitepuolen virtamuuntajilla on käytössä kaksi suojauskäämiä, joista toinen on muuntajan erovirtasuojaukselle ja toinen varasuojana toimivalle ylivirta- ja maasulkusuojaukselle.

Omakäyttömuuntajan yläjännitepuolen virtamuuntajilla on käytössä kaksi suojauskäämiä, joista toinen on erovirtasuojaukselle ja toinen omakäyttökojeiston syöttökentän ylivirta- ja maasulkusuojaukselle.

7.3 Generaattorisuojaus

Tässä uusintaehdotuksessa generaattorisuojaus toteutetaan kahdennettuna kuvan 32 mukaisesti siten että käytössä on pääsuoja ja varasuoja, jotka molemmat toimivat täysin itsenäisinä toisistaan riippumattomina suojina. Molempien suojien apusähkösyötöt tuodaan eri tasasähköjärjestelmien akustoilta.



Kuva 32 Generaattorisuojauksen periaate

Molemmissa suojissa on käytössä täysin samat suojaustoiminnot. Poikkeuksina tästä ovat kuitenkin staattorin 100 % maasulkusuojaus ja roottorin maasulkusuojaus, joita ei erillisten lisälaitteiden vuoksi pysty täysin kahdentamaan. Samoin tasajännitesuojauksen käynnistyskonvertterin maasulkusuojauksen toteutetaan vain toisessa suojassa. Roottorin ylikuormitussuojauksen voitaisiin myös haluttaessa liittää magnetointimuuntajan kojeiston sijasta toiseen generaattorisuojaan, mutta tällöin erovirtasuojauksen jäisi kyseisestä yksiköstä pois eikä laitetaso täysi kahdennus toteutuisi.

Suojaus toteutetaan siten, että mikäli toinen suojista jostakin syystä vikaantuu, teknisesti on mahdollista ajaa laitosta täysin normaalisti ja samalla vaihtaa vikaantunut suoja uuteen. Laitoksen omasta käyttöfilosofiasta riippuu, halutaanko näin tehdä.

Pää- ja varasuojan virtamittaukset otetaan mahdollisuuksien mukaan eri mittamuuntajilta, jännitemittauksien osalta tämä ei ole mahdollista.

7.4 Uuden generaattorisuojauksen toiminnot

Valitut suojaustoiminnot on esitetty liitteenä I olevassa taulukossa. Samassa taulukossa on näytetty myös alkuperäisten suojareleiden sisältämät toiminnot. Yhdellä silmäyksellä voidaan todeta, että käytettävissä olevien suojaustoimintojen määrä yhdessä numeerisessa suojassa on yli kaksinkertainen verrattuna siihen, mikä on toteutettu erillisillä staattisilla suojareleillä. Rajoittavaksi tekijäksi valitussa ratkaisussa muodostuu, ei niinkään tarvittavien suojaustoimintojen riittävyys vaan laitteen fyysisten tulojen, lähinnä virtamittauspiirien, määrä.

Vaikka kaikkia toimintoja uusista suojista ei otetakaan käyttöön, on uusi suojaus silti huomattavasti laajempi kuin vanhoilla laitteilla toteutettu. Muutoksia tai lisäyksiä verrattuna vanhaan suojaukseen käsitellään seuraavissa kappaleissa.

7.4.1 Muutokset verrattuna vanhaan suojaukseen

Staattorin 100 % maasulkusuojaus on aiemmin toteutettu kolmannen yliaallon mittaukseen perustuvalla menetelmällä. Menetelmä on kuvattu liitteessä A. Tässä menetelmässä on kuitenkin heikkouksia verrattuna liitteessä B esitettyyn aliharmonisen taajuuden (20Hz) syöttöön perustuvaan menetelmään, kuten jo kappaleessa 3.5.8 on todettu. Näin ollen staattorin 100% maasulkusuojauksen toteutustapa on tässä uusintaehdotuksessa päätetty vaihtaa 20Hz:n syöttöön perustuvaan menetelmään.

Roottorin maasulkusuojaukseen on aiemmin käytetty nimellistaajuuden 100V:n vaihtojännitteen syöttöön perustuvaa fn-R- menetelmää. Menetelmän kuvaus on esitetty liitteessä C. Pientaajuuden kanttiaaltojännitteen syöttöön perustuvassa menetelmässä (1...3Hz-menetelmä) on kuitenkin lukuisia etuja verrattuna fn-R- menetelmään, kuten jo kappaleessa 3.5.9 on todettu. Tämän vuoksi roottorin maasulkusuojaus on tässä tarkastelussa vaihdettu 1...3Hz- menetelmään. Tarkempi kuvaus toiminnosta on esitetty liitteessä D.

Käynnistyskonvertterin maasulkusuojaus oli jo vanhassa toteutuksessa mukana ja tässä ehdotuksessa se on toteutettu tasajännitesuojaustoiminnoilla. Kappaleen 3.5 taulukossa 1 sitä ei ole mainittu. Kuvaus toiminnosta on esitetty liitteessä K.

Vakioaikaylivirtasuojaus taas on tässä tapauksessa jätetty muiden toimintojen varasuojaksi, vaikka kappaleen 3.5 taulukossa 1 se on mainittu vain optiona ko. kokoluokan generaattoreille. Toiminto on vanhin sähkөөn perustuva suojausmuoto ja siitä on esitetty lyhyt kuvaus kappaleessa 3.5.3.

7.4.2 Lisäykset verrattuna vanhaan suojaukseen

Seuraavaksi on esitetty muutamia kappaleen 3.5 taulukossa 1 mainittuja suojaustoimintoja, joita ei aiemmassa suojauksessa ollut ollenkaan.

Staattorin 90% maasulkusuojaus on otettu käyttöön molemmissa suojareleissä ja toimii varasuojaustoimintona 100% maasulkusuojukselle. Tarkempi kuvaus toiminnosta on esitetty kappaleessa 3.5.7. Ylimagnetointisuojaus suojaa generaattoria ja blokkimuuntajaa äkillisen jännitteen nousun tai taajuuden laskun aiheuttamalta ylimagnetoinnilta. Siitä on lyhyesti kerrottu kappaleessa 3.5.15. Kierrossulkusuojaus voidaan ottaa käyttöön niin haluttaessa. Sen tarpeellisuus riippuu generaattorikäytön rakenteesta. Kierrossulkusuojuksen periaate on selitetty jo kappaleessa 3.5.5.

Epätahtisuojaus taas on oleellinen osa sekä sähköjärjestelmän stabiilisuuden hallintaa että generaattorin suojausta ja on sen vuoksi lisätty mukaan, vaikka kappaleen 3.5 taulukossa 1 sitä ei tämän kokoisille generaattoreille suositellakaan. Tähän suojaukseen liittyviä ilmiöitä ja kriteerejä on käsitelty kappaleissa 3.6 ja 3.7.

7.4.3 Täysin uudet suojaustoiminnot

Ehdotukseen on otettu mukaan myös joitakin täysin uusia suojaustoimintoja, joita ei kappaleen 3.5 taulukossa 1 ole mainittu.

Koska kyseessä on kaasuturbiinilaitos, joka käynnistetään käynnistyskonvertterilla, on käynnistuksen aikainen kytkentätilanne normaalista käytöstä poikkeava. Suojuksen kattavuus on haluttu varmistaa kaikissa tilanteissa, jonka vuoksi myös käynnistuksen aikainen ylivirtasuojaus on huomioitu. Valitussa suojuksessa on tähän tarkoitukseen oma suojaustoiminto.

Eräs uusista suojaustoiminnoista on tahaton verkkoon kytkentä [engl. inadvertent energization]. Tämä on useissa lähteissä [9] [20] todettu tarpeelliseksi uuden sukupolven suojaustoiminnoiksi, jota ei ole ollut käytännössä mahdollista vanhoilla suojuilla toteuttaa.

Katkaisijavikasuojaus on syytä ottaa käyttöön generaattorikatkaisijaa varten. Mikäli vikatilanteessa generaattorikatkaisija ei jostain syystä aukene, saadaan generaattori erotettua verkosta päämuuntajan yläjännitepuolen verkkokatkaisijan avulla.

Taajuuden muutosnopeussuojaus [engl. rate-of-frequency-change protection] on uusi toiminto, joka tarvittaessa erottaa laitoksen verkosta saarikäytölle nopeasti. Tämäkin suojaus liittyy generaattorin ja sähköjärjestelmän stabiilisuuden hallintaan ja täydentää siltä osin epätahtisuojausta.

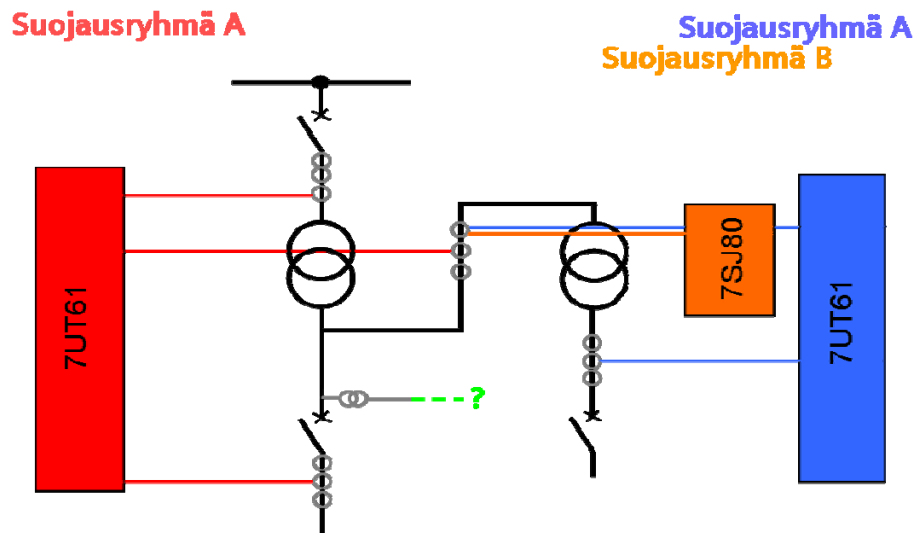
Edellä mainittujen suojaustoimintojen tarkemmat kuvaukset on esitetty liitteessä K. Lisäksi valituissa laitteissa on muitakin toimintoja, joita voidaan ottaa helposti käyttöön niin haluttaessa. Eräs näistä on jännitemittauspiirin valvonta. Se ei ole varsinainen

generaattorin suojaustoiminto, koska se ei laukaise katkaisijoita tai pudota generaattoria verkosta. Valvonnan tehtävänä on lukita suojien jännitemittaukseen perustuvat toiminnot jännitemittauspiirin katketessa esim. jännitemuuntajan sulakkeen palaessa.

7.5 Pää- eli blokkimuuntajan ja omakäyttömuuntajan suojaus

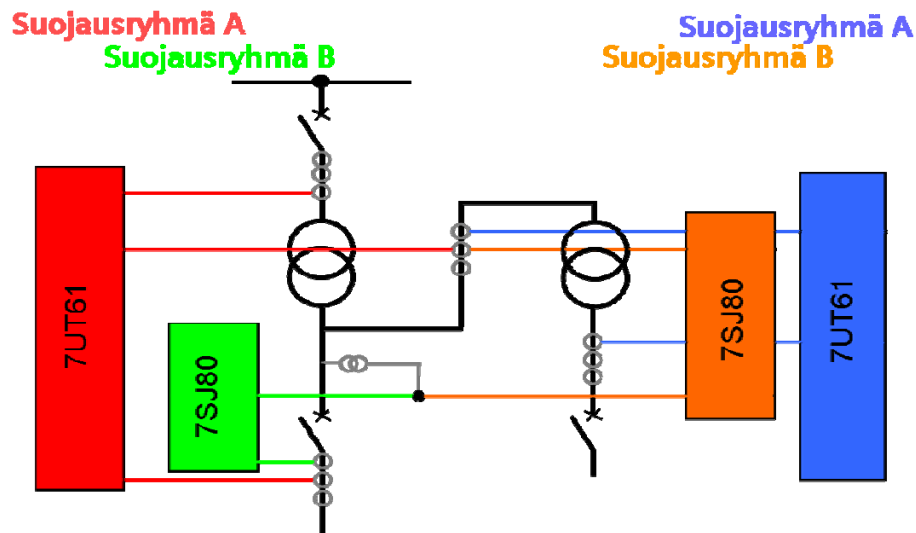
Tämänhetkisessä toteutuksessa blokkimuuntajalla on suojana ainoastaan erovirtasuoja ja omakäyttömuuntajalla erovirtasuoja ja sen varasuojana ylivirtasuoja.

Uusinnan osalta tarkasteltavana on kolme eri vaihtoehtoa. Ensimmäisenä vaihtoehtona, mikäli halutaan pitäytyä vanhan suojauksen filosofiassa, vanhat suojat vain korvataan uusilla. Tällöin blokkimuuntajalle ja omakäyttömuuntajalle tulee omat erovirtasuojansa ja erovirtasuojan varasuojana omakäyttömuuntajalle toimii ylivirta- ja maasulkusuoja kuvan 33 mukaisesti. Blokkimuuntajalla voidaan varasuojana käyttää erovirtasuojan ylivirtasuojastoimintoa. Jännitemittautieto konekiskon maasulkusuojausta varten voidaan viedä mihin tahansa kolmesta suojareleestä. Suojien apusähkösyötöt tuodaan valinnan mukaan kahden eri tasasähköjärjestelmän akustolta.



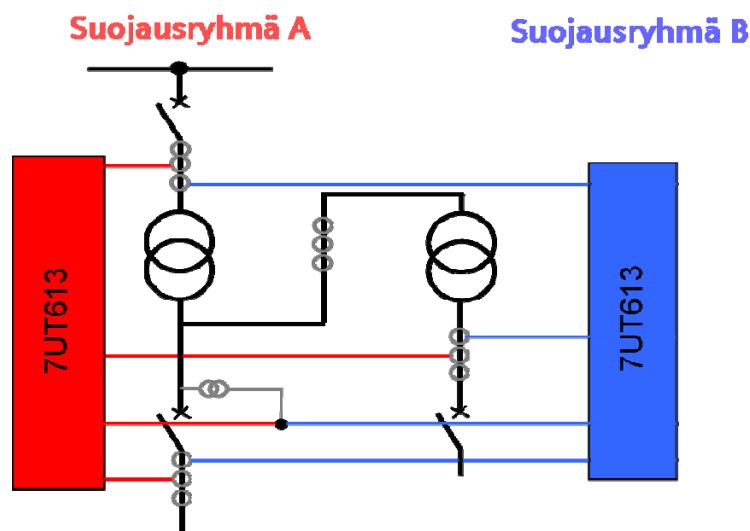
Kuva 33 Muuntajien suojaus, vaihtoehto 1

Toisena vaihtoehtona vanhat suojat korvataan uusilla siten, että blokkimuuntajalle ja omakäyttömuuntajalle kummallekin tulee oma erovirtasuojansa sekä sen varasuojaksi erillinen laite ylivirta- ja maasulkusuojausta varten kuvan 34 mukaisesti. Tätä voidaan pitää vyö- ja henkselit -tyyppisenä ratkaisuna, jossa oikosulkusuojaus molemmilla muuntajilla on erikseen kahdennettu. Tässäkin vaihtoehdossa suojien apusähkösyötöt tuodaan valinnan mukaan kahden eri tasasähköjärjestelmän akustolta.



Kuva 34 Muuntajien suojaus, vaihtoehto 2

Kolmantena vaihtoehtona erovirtasuojaus ulotetaan generaattorilta sekä päämuuntajan että omakäyttömuuntajan toisiopuolelle siten, että yksi kolmihaarainen suojarеле kattaa koko alueen kuvan 35 mukaisesti. Tämä erovirtasuojaus kahdennetaan siten että asennetaan toinen aivan identtinen suoja, jonka virrat otetaan mahdollisuuksien mukaan eri virtamuuntajilta kuin pääsuojan virrat. Erovirtasuojan kanssa samaan numeeriseen suojaan otetaan käyttöön myös ylivirta- ja maasulkutoiminnot, jotka toimintoina toimivat erovirtasuojauksen varasuojana. Molempien suojien apusähkösyötöt tuodaan eri tasasähköjärjestelmien akustoilta.



Kuva 35 Muuntajien suojaus, vaihtoehto 3

Kaikissa vaihtoehtoissa välivirtamuuntajat sekä päämuuntajan että omakäyttömuuntajan yläjännitepuolelta ja omakäyttömuuntajan alajännitepuolelta voidaan poistaa, koska numeerisilla suojilla sekä muuntajien kytkentäryhmien että virtamuuntajien muuntosuhteiden sovitus voidaan tehdä laskennallisesti.

7.6 Muuntajasuojauksen vaihtoehtojen vertailu

Ensimmäisen vaihtoehdon osalta suojaus säilyisi siis samanlaisena kuin se on nykyään, joten tätä vaihtoehtoa ei sen lähemmin tarkastella.

Toisessa vaihtoehdossa käyttöön tulisi siis neljä erillistä laitetta ja kolmannessa vaihtoehdossa kaksi. Kolmannen vaihtoehdon etuina voidaan pitää suojareleiden vähäisempää määrää ja suojauksen lähes täydellistä kahdennusta. Laitteiden ollessa identtisiä myös varaosien tarve vähenee.

Erityispiirteenä päämuuntajan erovirtasuojauksessa voidaan pitää käynnistyskonvertterin aiheuttaman virran huomioonottamista generaattorin käynnistymisen aikana siten että päämuuntajan erovirtasuojaa ei tarpeettomasti havahdu.

Nykyisessä suojauksessa tämä on toteutettu ottamalla erovirtasuojan muuntajan puoleinen virtamittaus omakäyttömuuntajan haarasta päämuuntajahaaran sijaan. Tarkemmin sanottuna, käynnistyskonvertterin käydessä ja generaattorikatkaisijan ollessa auki, erovirtasuojan muuntajan puoleinen virtamittaus otetaan omakäyttömuuntajan alajännitepuolelta. Tällöin suojattavana alueena on päämuuntajan sijaan konekisko. Generaattorikatkaisijan sulkeuduttua virtamittaus käännetään päämuuntajan yläjännitepuolelle, jolloin suojausalueeksi muodostuu konekisko ja päämuuntaja.

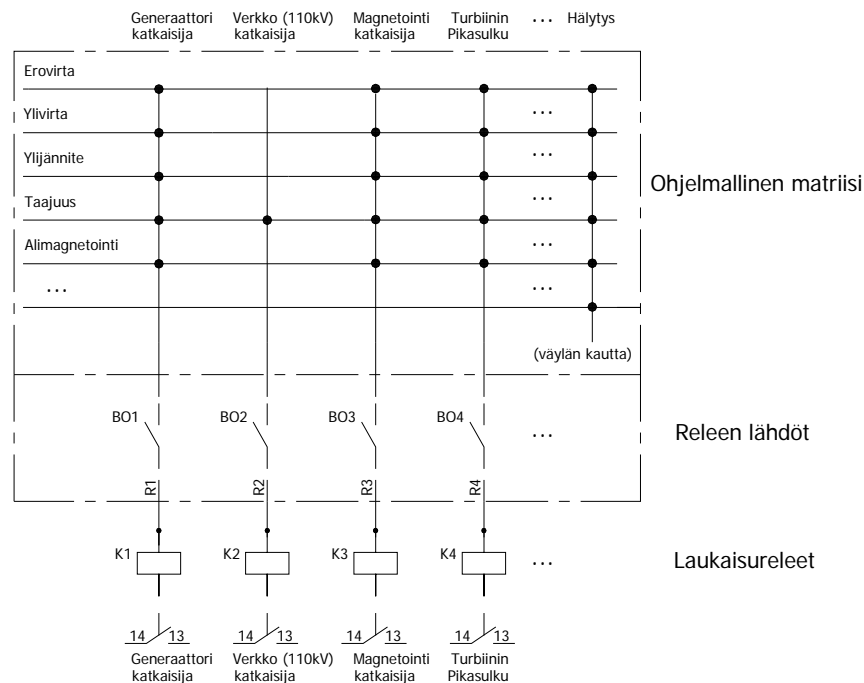
Lisäksi etenkin kolmannessa suojausvaihtoehdossa tulee ottaa huomioon suojausasetteluiden herkkyys päämuuntajahaarassa verrattuna omakäyttömuuntajaan. Kun generaattorikiskolla ensiövirta on 5000A:n luokkaa, päämuuntajan yläjännitepuolella se on vain 400A ja omakäyttömuuntajan alajännitepuolella 500A kun taas omakäyttömuuntajan yläjännitepuolella ainoastaan 300A.

Kaiken kaikkiaan mikäli suojaus halutaan tehdä nykyaikaisella tavalla ja pitää mahdollisimman kattavana, mutta kuitenkin yksinkertaisena, kolmas vaihtoehto on suositeltavin.

7.7 Laukaisut

Tässä uusintaehdotuksessa erillistä laukaisumatriisia ei käytetä vaan signaalien ja laukaisujen määrittely tehdään generaattorisuojan ohjelmallisella matriisilla. Releen ulostulosta laukaisu viedään laukaisureleen kautta halutuille katkaisijoille tai turbiinin pikasulkuun kuten kuvassa 36 on esitetty. Laukaisureleitä tulee yksi jokaista laukaistavaa toimilaitetta kohti siten, että myös muuntajasuojilta tulevat laukaisut

ohjataan samoille releille. Laukaisureleet sijoitetaan generaattorisuojien kanssa samoihin kaappeihin.



Kuva 36 Laukaisujen toteutusperiaate

Generaattorikatkaisijan laukaisupiirin valvonta toteutetaan erillisillä laukaisupiirin valvontareleillä siten, että jokaisella laukaisukelalla on oma valvontarele. Myös verkkokatkaisijan laukaisupiirin valvonta toteutetaan samalla tavoin. Laukaisupiirin valvonta voitaisiin toteuttaa myös generaattorisuojassa, mutta tällöin se olisi täysin suojasta riippuva, eikä toimisi esimerkiksi suojan ollessa jännitteetön.

Verkkokatkaisijan laukaisu viedään generaattorisuojakaapista katkaisijalle erillisten muuntimien ja valokuituyhteyden avulla. Verkkokatkaisijaan liitetyiltä suojilta lähtee laukaisukäsky binääritietona muuntimelle, joka muuttaa sen valokuituviestiksi. Viesti kulkee valokuitua pitkin sähköasemalle, jossa sijaitsee samanlainen muunnin, joka vuorostaan muuntaa valokuitusignaalin takaisin binääritiedoksi. Tämä binäärisignaali viedään edelleen katkaisijan laukaisukelalle, joka avaa katkaisijan. Myös laukaisun varayhteys on toteutettu samalla tavoin. Mikäli yhteys katkeaa, muuntimelta saadaan erillinen hälytys.

Haluttaessa säilyttää kahden erillisen yhteyden avulla saavutettava käyttövarmuus on huomioitava, että pää- ja varayhteys tulee tehdä eri kaapeleilla ja mikäli mahdollista, sijoittaa nämä kaapelit eri reiteille.

7.8 Suojauslaitteet ja niiden sijoitus

Suosittelavien suojaustoimintojen toteuttamiseen valitut laitteet ja niiden sijoitus on esitetty liitteessä J. Generaattorisuojaukselle riittää yksi suojauskaappi. Kaapissa sijaitsee generaattorin pääsuoja ja varasuoja sekä pää- ja varayhteyden signaaliuuntimet verkkokatkaisijan laukaisua varten.

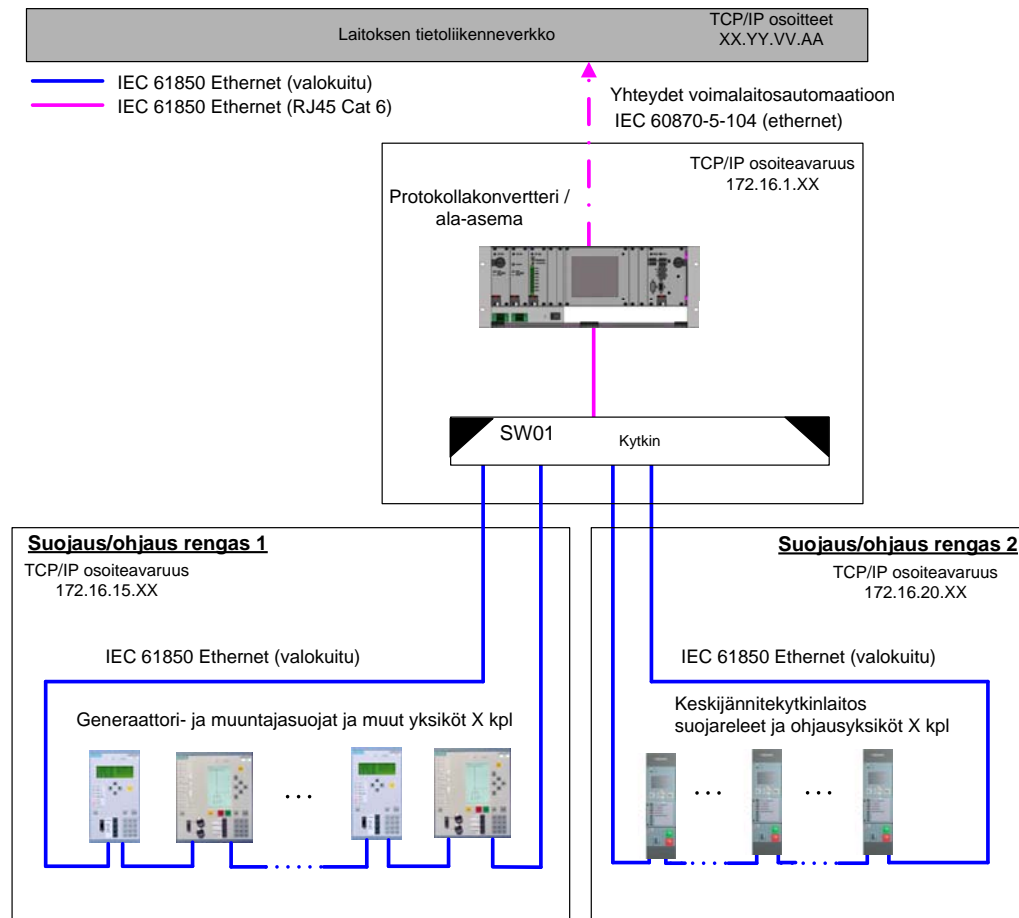
Muuntajasuojaukselle tulee valitusta vaihtoehdosta riippumatta ainoastaan yksi kaappi. Sinne sijoitetaan päämuuntajan ja omakäyttömuuntajan suojareleiden lisäksi myös omakäyttömuuntajan jännitteensäätäjä. Suositellussa suojausvaihtoehdossa kolme tämä tarkoittaa siis kahta kappaletta kolmihaaraisia erovirtasuojia.

Staattorin 100 % maasulkusuojaukseen tarvittavat 20Hz:n taajuuden syöttölaitteet voidaan haluttaessa sijoittaa nykyiseen tähtipistekaappiin. Kaapissa sijaitsevat tällä hetkellä tähtipistemuuntaja ja vastus, mutta tila todennäköisesti riittää myös uusien laitteiden sijoitukseen. Tähtipistemuuntajan sekä vastuksen mitoituksen riittävyys on syytä tarkistaa suojausuusinnan yhteydessä.

Roottorin maasulkusuojauksen vaatimat lisälaitteet täytyy tämän hetkisissä oloissa sijoittaa omaan koteloonsa, koska nykyiseen magnetointikaappiin ne eivät mahdu. Mikäli magnetointi on tarkoitus uusida samanaikaisesti suojauksen uusinnan kanssa, on lisälaitteet siinä yhteydessä mahdollista sisällyttää samaan kaappiin.

7.9 Suojareleiden kommunikointi

Releiden kommunikoinnissa on lähtökohdaksi otettu IEC 61850-standardin mukainen liikennöinti kuvan 37 osoittamalla tavalla. Fyysisenä väyläyhteytenä käytetään ethernet-valokuiturengasta, johon releet on liitetty. Myös muut voimalaitoksen suojareleet sekä generaattoritahdistimet on liitetty samaan valokuiturenkaaseen omina ryhminään. Voimalaitosautomaatioon liityntä tapahtuu protokollamuuntimena toimivan ala-aseman kautta IEC 60870-5-104 –protokollalla.



Kuva 37 Liittyntä automaatioon IEC 61850 releväylän ja IEC 60870-5-104 -protokollan avulla

7.10 Valittujen ratkaisujen sovellettavuus

Edellä esitetyt suojausratkaisut on valittu Vuosaaren A- yksikön generaattorille A1. Koska turbiinigeneraattoriyksikkö A2 on täysin samanlainen, soveltuvat kuvatut ratkaisut sellaisenaan myös sinne.

Höyryturbiinigeneraattorijärjestelmä A3 on rakenteeltaan erilainen, mutta pääosin valittua suojausratkaisua voidaan käyttää myös siellä. Suurimpina eroina generaattoriblokkeihin A1 ja A2 ovat tähtipisteen maadoitustapa sekä generaattorikatkaisijan ja omakäyttömuuntajan puuttuminen. Myös generaattorin A3 harjaton magnetointitapa poikkeaa A1:n ja A2:n harjallisesta magnetoinnista.

Aiemmin kuvatuista suojausratkaisuista generaattorisuojaus soveltuu sellaisenaan myös yksikölle A3. Käyttöön otettavista suojausfunktioista pois jää ainoastaan

käynnistyskonvertterin suojaus. Generaattorierovirtasuojaukseen voidaan ulottaa päämuuntajan yläjännitepuolelle asti.

Mikäli staattorin 100 % maasulkusuojaukseen halutaan toteuttaa kattavasti, täytyy generaattorin tähtipisteeseen lisätä tähtipistemuuntaja varustettuna 20Hz:n syöttöön tarvittavilla lisälaitteilla. Muutoin staattorin 100 % maasulkusuojaukseen jää pois tai voidaan toteuttaa olemassa olevaan laitteistoon ainoastaan kolmannen yliaallon tarkasteluun perustuvalla menetelmällä.

Kaikki laukaisut viedään generaattorikatkaisijan sijasta suoraan verkkokatkaisijalle ja omakäyttömuuntajan suojaus jää kokonaan pois. Näin jäljelle jäävät laitteet ovat pää- ja varageneraattorisuojat, joista toisen erovirtasuojaukseen ulotetaan generaattorin tähtipisteestä päämuuntajan yläjännitepuolelle asti sekä roottorin maasulkusuojaukseen tarvittavat laitteet.

8 YHTEENVETO

Työssä on perehdytty generaattorisuojauksen uusintaan. Aluksi käsiteltiin generaattorin magnetointia, toisiolaitteita sekä suojaareita. Tässä yhteydessä todettiin, että numeerisilla suojilla on monia etuja verrattuna vanhempiin sähkömekaanisiin tai staattisiin suojaareisiin. Näistä tärkeimpinä voidaan mainita suojaustoimintojen monipuolisuus ja itsevalvontatoiminnot.

Sitten tarkasteltiin generaattorin vikoja, suojauksen kahdennusta ja esiteltiin laukaisumatriisi sekä generaattorin tähtipisteen maadoitustavat. Seuraavaksi syvennyttiin generaattorin yleisiin suojaustoimintoihin sekä sivuttiin lyhyesti sähköjärjestelmän stabiilisuutta ja siihen liittyen epätahtisuojan toimintaa. Uusittavan suojauksen kriteerit sekä numeeristen suojien ominaisuudet käytiin läpi, samoin uusinnan aikataulutus ja laajuus. Myös numeeristen suojien kommunikointimahdollisuuksia esiteltiin ja niiden väylätoteutuksesta esitettiin kaavio.

Laskentaesimerkin avulla voidaan todeta, että suojaus uusinnan kustannukset eivät ole suuret verrattuna tuotantokatkoksesta johtuvasta tuotannon menetyksestä ja siitä syystä pörssistä ostetun sähkön kustannuksia tarkasteltaessa.

Esimerkkinä suojauksesta ja sen uusintaehdotuksesta on käytetty Helsingin Energian Vuosaari A1- kaasuturbiinin generaattoria. Suurimpana erona vanhaan suojaukseen on se, että kaikki generaattorin suojaustoiminnot on yhdistetty yhteen laitteeseen. Suojaus on kahdennettu käyttäen kahta identtistä suojaaretta, jotka on kytketty eri virtamuuntajiin.

Suosituksessa on mukana useita uusia suojaustoimintoja, joita vanhassa toteutuksessa ei ollut. Samoin staattorin 100 %:n maasulkusuojaukseen ja roottorin maasulkusuojaukseen on valittu toisentyypiset toteutustavat. Näitä on esitelty tarkemmin liitteissä. Blokki- ja omakäyttömuuntajan suojaukseen esiteltiin kolme eri vaihtoehtoa, joista jälkimmäisin toteutustapa kolmihaaraisen erovirtasuojan avulla on suositeltavin. Tämä suojaus on vielä kahdennettu käyttäen kahta identtistä suojaaretta, jotka on kytketty eri virtamuuntajiin.

Laukaisuihin on aiemmin käytetty matriisia, mutta suosituksessa ne tehdään ohjelmallisesti ja laukaisureleiden avulla. Blokkimuuntajan yläjännitepuolen verkkokatkaisijalle laukaisut on viety pitkistä siirtomatkaista johtuen signaalimuuntimien avulla valokuituyhteyttä käyttäen.

Numeeristen suojien väyläkommunikointi on otettu käyttöön. Tässä tapauksessa on päädytty suosittelemaan IEC 61850-standardin mukaista liikennöintiä, jossa suojaareet voivat suoraan kommunikoida keskenään. Lisäksi tarvittavat tiedot välitetään voimalaitosautomaatio-järjestelmään protokollakonvertterina toimivan ala-aseman kautta. Tämä mahdollistaa nopean ja kattavan tiedonsiirron ja tapahtumien analysoinnin.

Laitteiden vähäisestä määrästä johtuen uusintaesimerkissä esitetty yksittäinen ratkaisu on kohtalaisen helposti sovellettavissa sellaisenaan muihinkin kohteisiin.

Lähempää tarkastelua, joihin tämän työn puitteissa ei ollut mahdollisuutta, vaatisivat laukaisujen siirtäminen IEC61850-väylällä verkkokatkaisijalle sekä todellisen tuotannon keskeytyshinnan laskeminen vikatapauksessa.

VIITTEET

[1] Energiavuosi 2008, tiedotustilaisuus 22.1.2009, lehdistötiedote 22.1.2009. Päivitetty 21.1.2009 Viitattu 24.02.2009.

Saatavilla:

<http://www.energia.fi/content/root%20content/energiatollisuus/fi/ajankohtaista/lehdist%c3%b6tiedotteet/liitteet/2009/s%c3%a4hk%c3%b6vuosi%202008%20www-kuvat%20suom.ppt?SectionUri=%2ffi%2fajankohtaista%2flehdistotiedotteet>

[2] Boldea, Ion, Synchronous generators. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2006. ISBN 0-8493-5725-X

[3] Aura, Lauri, Tonteri, Antti J., Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet. Helsinki, Suomi: WSOY 1996. ISBN 951-0-20167-7

[4] Kiameh, Philip, Power generation handbook: selection, applications, operation and maintenance. New York, New York, USA: McGraw-Hill, 2003. ISBN 0-07-139604-7

[5] Herrmann, Hans-Joachim, Siemens AG, PTD PA13 / 2004 koulutusmateriaali. Ei julkinen.

[6] Mörsky, Jorma, Relesuojaustekniikka. Helsinki, Suomi: Otatieto 1992. ISBN 951-672-175-3

[7] 4M Protective and Measuring Transformers, Medium-Voltage Equipment, Selection and Ordering Data Catalog HG 24 2009, Siemens AG Energy Sector Freyeslebenstrasse 1 91058 Erlangen, Germany, E50001-K1524-A101-A3-7600

[8] GEC Measurements, Protective Relays Application Guide, Stafford, England, Great Britain: ICA Advertising & Marketing Limited, Manchester Third edition, 1987.

[9] Chau. N.H, Gardell, J.D, Patel, S.C, Upgrading and Enhancing the Generator Protection System by Making Use of Current Digital Systems, IEEE Transactions on NUCLEAR SCIENCE, VOL. 43, NO. 3, JUNE 1996. 0018-9499/96 ©1996 IEEE.

[10] Tuukkanen Jukka, Myyntipäällikkö. Siemens Osakeyhtiö, Energy Sector, Transmission division. Espoo, Majurinkatu 6 02600 Espoo. Haastattelu 19.03.2009.

[11] Electromechanical Relay GE direct replacements and nuclear applications, 1VAC386401-FL Rev A May 2007, ABB Inc., 4300 Coral Ridge Drive, Coral Springs, Florida, USA. Viitattu 13.07.2009.

Saatavilla:

[http://library.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/e4faf9bd700e7a3fc125766500706c57/\\$File/em_relay_flyer.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/e4faf9bd700e7a3fc125766500706c57/$File/em_relay_flyer.pdf)

[12] SIPROTEC Numerical Protection Relays, Protection System Catalog SIP 2008. Siemens AG, Energy Sector, Energy Automation, Nuernberg, Germany 2008. E50001 K4400-A101-A5-7600 Dispo 31900, KG 06.08 10.0 1016, En 102869 6101/6500 Viitattu 02.02.2009.

Saatavilla: http://siemens.siprotec.de/download_neu/devices/1_General/Catalog_SIP-2008/SIPROTEC_Catalog_2008_A6_en.pdf

[13] Anderson, P.M., Power System Protection. New York, New York, USA: McGraw-Hill, 1999 / Piscataway, New Jersey, USA: IEEE Press, 1999. McGraw-Hill ISBN 0-07-134323-7, IEEE ISBN 0-7803-3427-2

[14] Blackburn, J.Lewis, Domin, Thomas.J, Protective Relaying Principles and Applications, third edition. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2007. ISBN 1-57444-716-5

[15] Applications for SIPROTEC Protection Relays 2005. Siemens Aktiengesellschaft, Power Transmission and Distribution, Energy Automation Division, Nuernberg, Germany 2005. E50001-K4451-A101-A1-7600. Viitattu 20.03.2009.

Saatavilla:

http://siemens.siprotec.de/download_neu/applications/SIPROTEC/english/Applications_SIPROTEC_complete_en.pdf

[16] Auslösematrix für Generator-Schutzeinrichtungen GKV 20x28 621 SK K Art. 674.115.157.00 Technisches Handbuch. GHIELMETTI AG, Industriestrasse 6, CH-4562 Biberist, Schweiz. Viitattu 24.5.2009.

Saatavilla:

http://www.ghielmetti.ch/index.php?nav=19,48,107&Kategorie=Auslösematrix-mit%20Speicher&prod_id=16.

http://www.ghielmetti.ch/docs/PDF/gkv_20x28_621_sk_r_k-d.pdf

[17] Pope, J.W, A Comparison of 100% Stator Ground Fault Protection Schemes for Generator Stator Windings, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 4, April 1984. 0018-9510/84/0400-0832 © 1984 IEEE.

[18] SIPROTEC Multifunction Machine Protection 7UM62 V.4.61 Manual. Siemens AG, Energy Sector, Energy Automation, Nuernberg, Germany 2008. C53000-G1176-C149-5. Viitattu 20.02.2009.

Saatavilla: http://siemens.siprotec.de/download_neu/devices/7UM62x/Manual/7UM62x_x_Manual_A5_V046101_EN.pdf.

[19] Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset (VJV 2007), Fingrid Oyj. Viitattu 24.2.2009.

Saatavilla: http://www.fingrid.fi/attachments/fi/palvelut/kantaverkkopalvelut/liittyminen/vjv2007yhdistetty_200308_suo.pdf

[20] Mozina, Charles J, Upgrading the Protection of Generators to Meet Current IEEE Standards, Inaugural IEEE PES 2005 Conference and Exposition in Africa, Durban, South Africa, 11-15 July 2005, 0-7803-9327-9/05 ©2005 IEEE

[21] Yalla, Murty V.V.S et al., Application of Multifunction Generator Protection Systems, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 4, October 1999, Working Group .I11 of the Rotating Machinery Protection Subcommittee, Power System Relaying Committee. 0885-8977/99 ©1998 IEEE.

[22] Pettigrew, Robert D., Generator Protection: The Value of Periodic Settings Review, 59th Annual Conference For Protective Relay Engineers, Texas A&M University April 4-6, 2006, 1-4244-0043-0/06 ©2006 IEEE.

[23] Mozina, Charles J et al., Coordination of generator protection with generator excitation control and generator capability, Working Group J-5 of the Rotating Machinery Subcommittee, Power System Relay Committee, 1-4244-1298-6/07 ©2007 IEEE.

[24] Schaeffler, Thomas et al. Process Communication in Switchgear according to IEC 61850 – Architectures and Application examples. B5-106, CIGRE Session 2008. Pariisi, Ranska. 24.-29-8-2008.

[25] Brunner, Christoph, General Report for Study Committee B5 (Protection and automation) Preferential Subject 1 Impact of process bus (IEC 61850-9-2) on protection and substation automation system. CIGRE Session 2008. Pariisi, Ranska. 24.-29-8-2008.

[26] Ilmatieteen Laitos, Ilmastotilastot, Tammikuun 2009 sää ja tilastot. Viitattu 06.11.2009.

Saatavilla: http://www.fmi.fi/saa/tilastot_51.html#1

[27] Nord Pool Spot AS, Vollsveien 19, NO - 1325 Lysaker, NORWAY. Viitattu 25.5.2009. Saatavilla: <http://www.nordpoolspot.com/reports/areaprice/Post.aspx>

http://www.nordpoolspot.com/upload/reports/areaPrice_daily_This%20year.xls

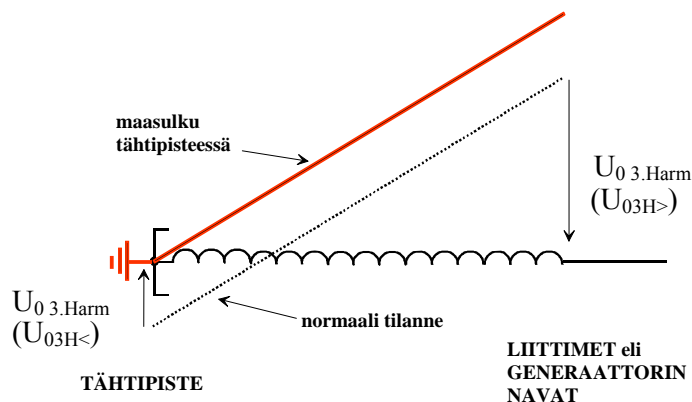
[28] Helsingin voimalaitokset, Vuosaaren maakaasuvoimalaitokset, Hanasaaren ja Salmisaaren kivihiiivoimalaitokset, painettu esite, Helsingin Energia 2002.

LIITE A Staattorin 100% maasulkusuojaus (3. yliaalto)

Nollajännitteen perusaallon mittausta hyödyntäen voidaan suojata 90...95% staattorikäämistä. Mikäli halutaan saavuttaa staattorikäämin 100%:n suojaustaso täytyy käyttää ei-verkkotajuista jännitettä. Tässä suojauksessa siihen tarkoitukseen on käytetty kolmatta yliaaltoa.

Kolmas yliaalto syntyy kaikissa generaattoreissa suunnilleen samalla tavoin. Sen aiheuttaa napojen muoto. Kun maasulku syntyy, staattorikäämityksessä loiskapasitanssien suhde muuttuu, koska yksi kapasitansseista oikosulkeutuu maasulun vaikutuksesta. Tästä johtuen tähtipisteessä mitattu kolmas yliaalto pienenee, kun taas generaattorin liittimistä mitattu kolmas yliaalto suurenee alla olevan kuvan 1 mukaisesti. Kolmas yliaalto muodostaa nollajärjestelmän ja voidaan täten havaita tähti-kolmio – kytketyllä jännitemuuntajalla tai laskemalla nollajärjestelmä vaihejännitteistä. Lisäksi kolmannen yliaallon taso riippuu generaattorin toimintapisteestä, toisin sanoen se määritellään pätötehon ja loistehon funktiona. [18]

Koska kolmannen yliaallon jakauma vaihtelee eri generaattoreiden välillä, voidaan tämän periaatteen soveltaminen joskus määrittää ainoastaan ensiökokeilla. Yliaaltojen esiintyminen kun mittauspiste on esim. tähtipisteessä, voidaan havaita vasta kun nimellisjännite on mitattavissa. Yliaaltojen osuus riippuu myös generaattorin käyttötilanteesta, jolloin pätö- ja loistehon vaikutus täytyy ottaa huomioon. Tästä syystä sovellus ei ole aina mahdollinen ja sovelluksella on rajattu toiminta-alue. Kiskokytkeillä generaattoreilla kaikki koneet tuottavat kolmatta yliaaltoa, jolloin koneiden erottaminen toisistaan vaikeutuu. [18]



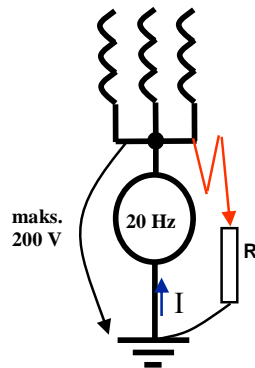
Kuva A1 Kolmannen yliaallon profiili staattorikäämityksen suhteen [5]

LIITE B Staattorin 100% maasulkusuojaus (20Hz)

Aliharmonisen jännitteen syöttöön perustuvan staattorin maasulkusuojan tehtävänä on tunnistaa maasulut sellaisten vaihtovirtakoneiden staattorikäämyksessä, jotka on kytketty verkkoon blokkimuuntajan kautta.

20Hz- syöttöjännitteen avulla toimiva suoja on riippumaton maasulussa esiintyvälle verkkotaajuiselle nollajännitteelle ja se havaitsee maasulut käämityksen koko alueella koneen tähtipiste mukaan lukien. Syöttöjännite on noin 1% vaihejännitteestä, joten käämityksen eristykseen ei aiheudu ylimääräistä rasitusta. Maasulkutilanteissa 20Hz syöttöjännitelähde synnyttää pienen maasulkuvirran vikapaikan yli. [18]

Suoja liitetään yleensä maadoitusmuuntajan avokolmiokäämin avulla generaattorin johtimiin rinnan kuormitusvastuksen R kanssa. Se voidaan liittää myös nollapiste- eli tähtipistemuuntajan avulla generaattorin tähtipisteen ja maan väliin. [18]



Kuva B1 Jännitesyötön periaate generaattorin tähtipisteeseen [18]

Ulkoisella laitteella muodostettu 20Hz syöttöjännite ohjataan 20Hz taajuudelle sovitetun suodattimen kautta kuormitusvastukselle kuvan 2 mukaisesti, jossa se saa aikaan jännitehäviön. Tämä jännite siirtyy generaattorin puolelle ja aiheuttaa varauksen generaattorin tähtipisteessä maata vasten, jolloin staattoripiirin maakapasitanssien kautta kulkee pieni maasulkuvirta. [18]

Tämä virta johdetaan pienvirtamuuntajan avulla suojalle. Mittausvirrasta I_{ses} ja kuormitusvastuksen napoihin vaikuttavasta varausjännitteestä U_{ses} muodostetaan osoitinsuureet U_{20} ja I_{20} , joista lasketaan numeerisen suodatuksen jälkeen maavastus. Suodatin estää 20Hz:stä poikkeavien taajuuksien vaikutuksen laskennassa. [18]

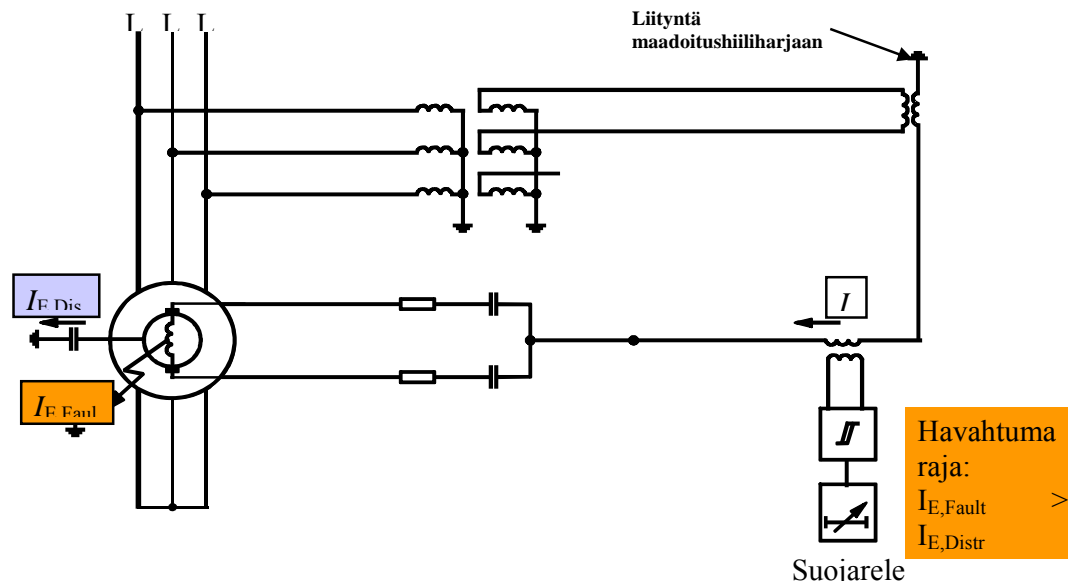
LIITE C Roottorin maasulkusuojaus (fn, R-mittaus)

Roottorin fn-R -maasulkusuoja käyttää toimintaansa ulkoista nimellistajajuista noin 36...45V:n apuvaihtojännitettä, joka voidaan ottaa esimerkiksi jännitemuuntajilta kytkentäyksikön kautta. Kytkeäköjeseen avulla jännite kytketään symmetrisesti magnetointipiiriin ja samanaikaisesti suojan mittaussisääntuloon.[18]

Apuvaihtojännite synnyttää pienen latausvirran, kytkentäkojeen, harjojen vastuksen ja magnetointipiiriin maakapasitanssien läpi. Normaaliikäytössä tämä virta on muutamia milliampeereja. Suojarele mittaa edellä mainittua virtaa. [18]

Suojarele laskee kompleksisen maaimpedanssin vaihtoapujännitteen ja kulkevan virran avulla. Maaimpedanssista voidaan laskea edelleen magnetointipiiriin maavastus. Laskennassa huomioidaan kytkentäkojeen kytkentäkapasitanssi, harjojen vastukset ja magnetointipiiriin maakapasitanssit. Tällä menetelmällä voidaan tunnistaa suhteellisen suuriohmiset maasulut, ideaaltilanteessa 30kΩ:in asti. [18]

Mittaussuureet suodatetaan ennen niiden laskennallista käsittelyä, jotta yliaallot eivät vaikuttaisi tulokseen. Yliaaltoja syntyy varsinkin jos magnetoinnissa käytetään puolijohdekomponentteja kuten tyristori- tai pyörivää tasasuuntaajaa. [18]



Kuva C1 Roottorin maasulkusuojaus (fn-R-mittaus) kytkentä [5]

LIITE D Roottorin maasulkusuojaus 1...3Hz

Roottorin 1...3Hz:n maasulkusuoja toimii 50V:n tasajännitteellä, jonka polariteetti käännetään noin 1...3 kertaa sekunnissa. Tämä roottoripiirin syöttöjännite U_H muodostetaan esikytkentälaitteella, jonka vaatima apujännite voidaan ottaa jännitemuuntajilta. Vastuskojeen avulla jännite kytketään symmetrisesti suuriohmisten vastusten kautta magnetointipiiriin ja jännite liitetään samanaikaisesti maapotentiaaliin matalaohmisen mittausshuntin R_M avulla kuvan 1 mukaisesti. [18]

Tasajännite U_H aiheuttaa jokaisen polariteetin vaihdon yhteydessä latausvirran vastuskojeen läpi magnetointipiirin maakapasitansseissa. Tämä virta aiheuttaa esikytkentäkojeen mittausshuntissa jännitteenaleneman U_{mittaus} , jota suoja käyttää toimintaansa. [18]

Käytettäessä tasajännitettä varausjännitteenä eliminoidaan roottoripiirin maakapasitanssien vaikutukset. Sitä varten shuntijännitteen U_{mittaus} määrittely suoritetaan vasta kunnes saavutettu tila on vakavoitunut, eli maakapasitansseista johtuva muutostila on vakiintunut. Tämä tila saavutetaan, kun shuntilla oleva mittaussjännite saavuttaa vakaan loppuarvon. Tällä tavoin voidaan tunnistaa erittäin suuriohmisia maasulkuvikoja aina $80k\Omega$:in asti riippumatta maakapasitanssien suuruudesta ja muutoksesta. [18]

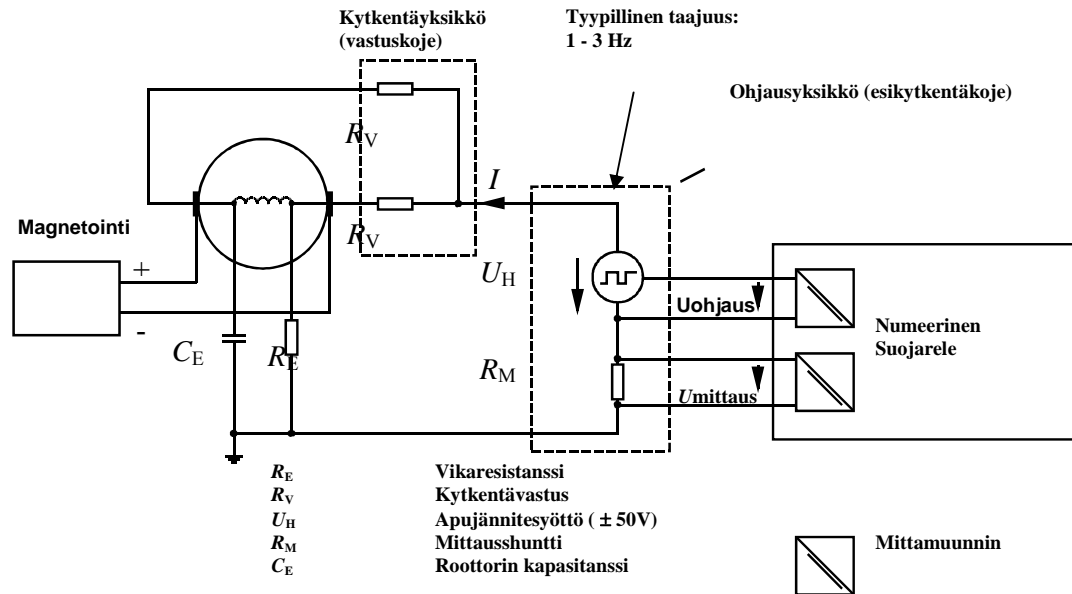
Kaksi häiriösuuretta voi vääristää mittausta: ensimmäinen muodostuu, riippuen magnetointijännitteen suuruudesta ja magnetointikäymässä olevan maasulun tilasta ja toinen tasajännitekomponentin siirtyessä mittauspiiristä toiseen jolloin magnetointitasajännitteeseen voi muodostua suuri vaihtojännitevaraus. Nämä yliaaltojen vaikutukset, joita esiintyy erikoisesti staattisilla magnetointilaitteilla (tyristori tai pyörivä tasasuuntaaja) vaikutukset estetään suodattamalla mittaussuureet numeerisesti. [18]

Varautuneen tasajännitekomponentin aiheuttaman häiriön vaikutus poistetaan kääntämällä syöttöjännitteen U_H polariteetti jokaisen mittauksen jälkeen. Polariteetin vaihto tapahtuu automaattisesti kun mittaussjännite U_{mittaus} on saavuttanut vakaan loppuarvon. Suojarele lähettää ohjauskäskyn esikytkentälaitteelle. Tästä seuraa, että tasajännitteen polariteetin vaihtotaajuus ei ole vakio vaan se on riippuvainen maakapasitanssien ja maavastusten suuruudesta. [18]

Kahden toisilleen vastakkaismerkkisen mittauksen muodostama eromittautulos U_{mittaus} arvo nousee, kun siihen lisätään syöttöjännitteen U_H aiheuttama tasajännitekomponentti. Tämä mittautulos on suoraan verrannollinen maasulkuarvoon ja sitä käytetään suojaustoimintaan ja käyttöosoitukseen. [18]

Koska myös terveessä tilassa kulkee virtaa, joka on kapasitiivista latausvirtaa polariteetin vaihdon seurauksena voi suoja tunnistaa mittauspiirin katkokset jos maakapasitanssi on vähintään $0,15\mu F$. Samoin voidaan tunnistaa esikytkentälaitteen häiriöt ja suorittaa niistä hälytys. [18]

Koska syöttöjännite roottoripiirissä on tasajännitettä ja kaikki muut jännitteet suodatetaan mittausperiaatteen avulla, voidaan suojaa käyttää rinnan fn-R- roottorin maasulkusuojan kanssa. [18]



Kuva D1 Roottorin maasulkusuojaus 1...3Hz kytentä [5]

LIITE E Uusintaprojektin toteutusvaiheet, tarkistuslista

E.1 Kokonaisnäkemys

- Uusintatarpeen arviointi
- Uusinnan laajuuden määrittely (huom rajapinnat muihin järjestelmiin)
- Uusinnan ajankohta (vuosi?)
- Speksien laatiminen (onnistuuko itse vai tarvitaanko ulkopuolista
- Lähtötietojen keruu ja niiden oikeellisuuden varmistaminen
- Puuttuvien tietojen hankkiminen tai laskeminen
- Tulevaisuuden toimintaympäristö ja sen asettamat vaatimukset
- Haluttujen suojaustoimintojen määrittely
- Suojauksen liityntä muihin järjestelmiin ja niiden asettamat vaatimukset kommunikoinnille.
- Esisuunnittelu (huom ! rajapinnat muihin järjestelmiin)
- Tarjouskysely
 - Laitteet
 - Asennus
 - Käyttöönotto
 - Koulutus
- Tarjousten vertailu
- Investoinnin turvallisuus
- Käyttäjäturvallisuus

E.3 Tarjousten vertailu

- Teknisesti tarkoitukseen sopiva ratkaisu
 - sisältää kaikki kysytyt / tarvittavat suojaustoiminnot
 - toimittajan ehdottamat poikkeamat kyselystä lisäykset/muutokset
- Yhteensopivuus muiden järjestelmien kanssa
- Tulevaisuuden liityntä- ja laajennusmahdollisuudet
- Varaosien saatavuus
- Tuotetuen saatavuus
- Eliniän odote
- Huollettavuus, kunnossapito, huollon tarve
- Käyttäjäturvallisuus
- Käytettävyyys
- Onko luotettava/vakavasti otettava toimittaja?
- Onko toimittaja olemassa vielä vuosien päästä?
- Toimittajan kyky hoitaa ko. projektia (referenssit)
- Huoltopalvelut

E.2 Spesifikaatioiden laatiminen, esisuunnittelu ja tarjouskysely

- Mistä tarvittavat lähtötiedot saadaan?
- Osataanko arvioida, mitä tarvitaan, onko oma osaaminen ajan tasalla?
 - tarvittaessa ulkopuolisten asiantuntijoiden käyttö.
 - kyselyaineiston ja speksien kyseenalaistaminen
 - tarvittavien asiantuntijoiden löytäminen
- Onko verkon maadoitustapa pysynyt samana
- Onko generaattorilla tähtipistemuntajaa, jos on, niin sen arvot
- Ovatko verkonhaltijan ohjeet suojauksen ja käytön suhteen
- Onko generaattorin tilanne sama kuin silloin kun asennus on laitettu
- Onko syötettävä verkko muuttunut oleellisesti
- Olemassa olevien releasettelujen arviointi.
 - Mistä asennus on saatu
 - Onko laskettu itse
 - Onko laskettu ulkopuolisella, miten laskettu
 - Asennus vain niin kuin ennenkin

Sen jälkeen kun lähtötietoja on saatu on syytä arvioida niiden laatu ja tarvittaessa käyttää ulkopuolisia asiantuntijoita kokonaisuuden hahmottamiseen.

Tarvittavien asiantuntijoiden löytäminen saattaa olla haasteellista. Omassa yrityksessä ei välttämättä ole alan osaajaa ja erilaiset konsulttitoimistot tarjoavat palveluksiaan auliisti, mutta osataanko arvioida heidän osaamistasonsa ja kuinka hyvin he seuraavat aikaansa?

Vaikka joku olisi esimerkiksi kymmenen tai kaksikymmentä vuotta sitten ollut alan osaaja, onko kyseinen henkilö pysynyt ajan tasalla ja päivittänyt tietonsa vastaamaan tämän päivän vaatimuksia

E.4 Investoinnin turvallisuus

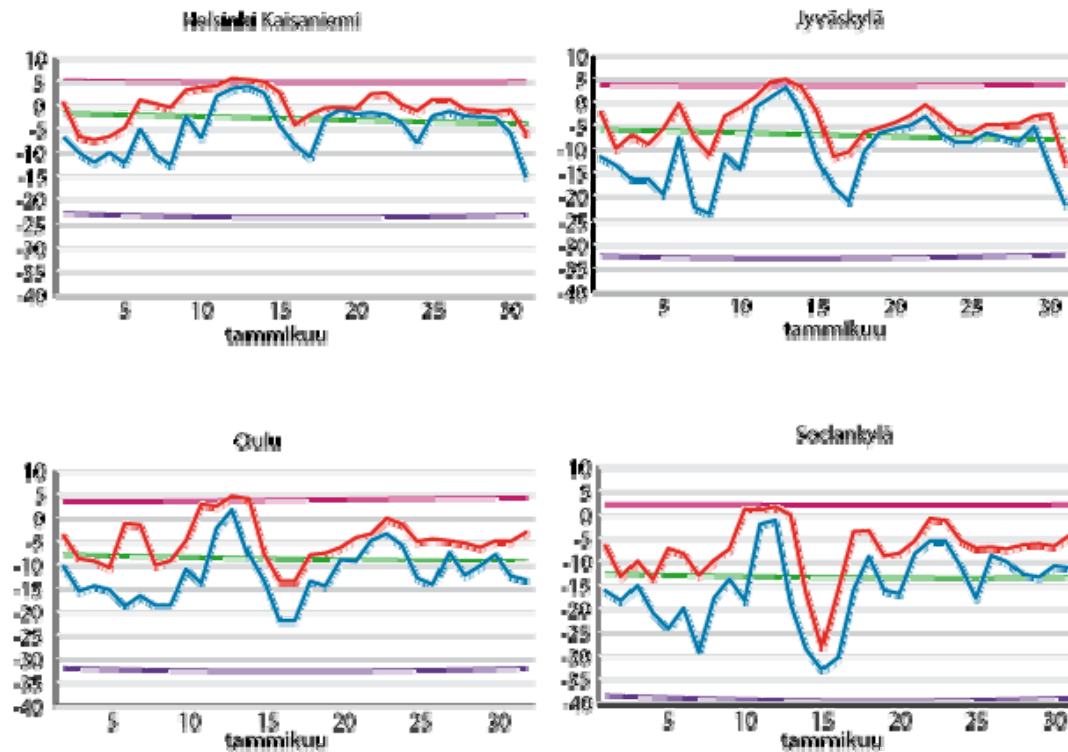
- Varaosien saatavuus
 - Onko varaosia saatavana vielä 10 tai 15 vuoden päästä?
 - Jos varaosia hankitaan varastoon, niiden säilytys?
 - Tarvitseeko varaosia testata ja jos niin kuinka usein, miten hoidetaan?
- Tuotetuki
 - Onko tuotetuki saatavana Suomessa,
 - Onko tuotetuki saatavana suomen kielellä?
 - Onko dokumentaatio saatavana suomen kielellä?
 - Onko 20 vuoden päästä saatavilla vielä tuotetukea ja dokumentaatiota Suomessa ja suomen kielellä?
- Huollettavuus, kunnossapito, huollon tarve
 - Tarvitseeko ohjelmistopäivityksiä määrävällein?
 - Saako ohjelmistopäivityksiä tarvittaessa?
 - Virhetointimien todennäköisyys (ali- ja ylitointiminta)
 - Onko itsevalvontaa?
 - Tarvitseeko laitteita testata ja jos niin kuinka usein, miten hoidetaan?
 - oma testilaitteisto/ toimittaja testaa/ ostetaan muualta)
 - Eliniän odote
 - eli kuinka kauan laitteiden voidaan olettaa toimivan moitteettomasti?

E.5 Käyttäjäturvallisuus ja käytettävyyys

- Onko selkeä näyttö
- Onko graafinen näyttö
- Onko tekstinäyttö
- Onko näyttö valaistu
- Ovatko tekstit suomen kielellä
- Onko hakemistorakenne selkeä
- Saako yleisimmin tarvittavat toiminnot helposti näkyviin
- Ovatko eri laitteet keskenään samanlaisia käyttää
 - eli onko eri laitteilla samanlainen käyttöliittymä
- Tarvitaanko erikoistietoja / laitteita
- Onko turvallinen/käyttöturvallinen?
 - virheellinen näppäily ei aiheuta toimintaa
 - suojattu salasanalla
 - muutokset/ohjaukset varmistetaan ennen toteutusta
 - eli ei mene yhdellä näppäimenpainalluksella
- Voiko laitteen asennusta muuttaa myös käyttötilanteessa

LIITE F Lämpötilatilasto tammikuu 2009

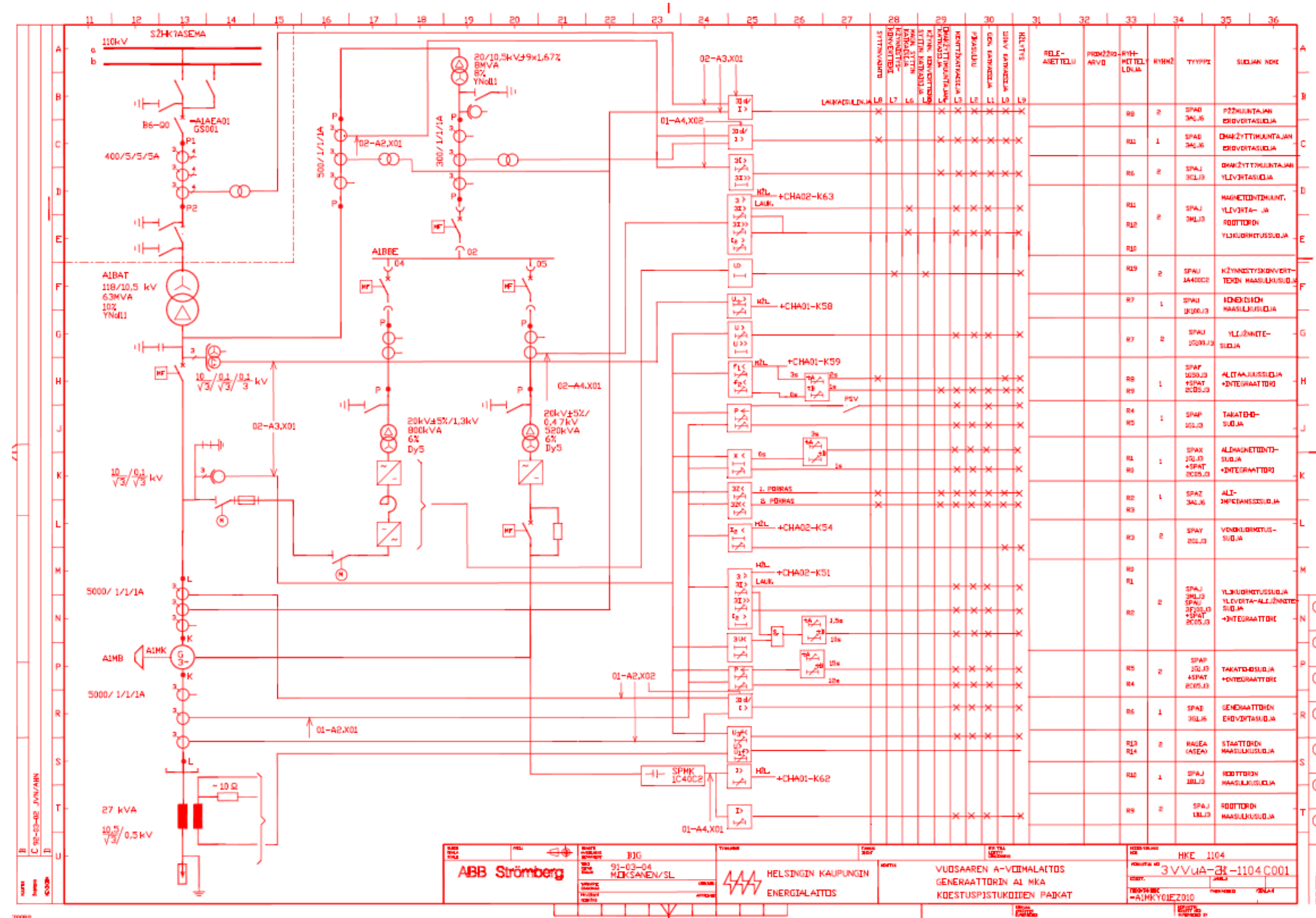
Ilmatieteen Laitos, Ilmastotilastot, Tammikuun 2009 lämpötiloja



Kuva F1 Tammikuun 2009 lämpötiloja [26]

Päivittäiset ylin (punainen) ja alin (sininen) lämpötila tammikuussa 2009. Ohuet tasoitetut viivat kuvaavat kummankin muuttujan 3% tilastollista todennäköisyyttä eli ovat poikkeuksellisen lämpötila-arvon rajat. Keskellä oleva vihreä viiva kuvaa vuorokauden keskilämpötilan 50% sijainnin vertailukaudella 1971-2000. [26]

LIITE H Vuosaaren A1- generaattorin suojauskaavio



LIITE I Vuosaaren valitut suojaustoiminnot

Suojaustoiminto	Protection functions	IEC-koodi	ANSI-koodi	Pääsuoja 7UM622	Varasuoja 7UM622	Vanhat
Erovirtasuojaus	Current differential protection	ΔI	87G/87T/87M	X	X	X
Staattorin maasulkusuojaus, suuntaamaton, suunnattu	Stator earth-fault protection non-directional, directional	$V_0>, 3I_0>/(V_0, 3I_0)$	59N, 64G / 67G	X	X	
Herkkä maasulkusuojaus (myös roottorin maasulkusuojaus)	Sensitive earth-fault protection (also rotor earth-fault protection)	$I_{EE}>$	50/51GN (64R)	ei	ei	
Herkkä maasulkusuojaus B (esim. laakerivirtasuojaus)	Sensitive earth-fault protection B (e.g. shaft current protection)	$I_{EE-B}> I_{EE-B}<$	51GN	ei	ei	
Staattorin ylikuormitussuojaus	Stator overload protection	I^2t	49	Pystyykö turbiini tuottamaan ylikuormaa?		X
Vakioaikaylivirtasuojaus alijännitelukituksella	Definite-time overcurrent protection with undervoltage seal-in	$I> +V<$	51	X	X	X
Vakioaikaylivirtasuojaus, suunnattu	Definite-time overcurrent protection, directional	$I>>, Direc.$	50/51/67	ei	ei	
Käänteisaikaylivirtasuojaus	Inverse-time overcurrent protection	$t=f(I)+V<$	51V	ei	ei	
Ylijännitesuojaus	Overvoltage protection	$V>$	59	X	X	X
Alijännitesuojaus	Undervoltage protection	$V<, t=f(V)$	27	X	X	
Taajuussuojaus	Frequency protection	$f<, f>$	81	X	X	X
Takatehosuojaus	Reverse-power protection	$-P$	32R	X	X	XX
Ylimagnetointisuojaus	Overexcitation protection (Volt/Herz)	V/f	24	X	X	
Jännitteenmittauspiirin valvonta	Fuse failure monitor	$V_2/V_1, I_2/I_1$	60FL	X	X	
Ulkoiset laukaisut	External trip coupling	Incoup.		4	4	
Laukaisupiirin valvonta	Trip circuit supervision	T.C.S	74TC	tehdään releillä	tehdään releillä	
Eteenpäin menevän tehon valvonta	Forward-power protection	$P>, P<$	32F	ei	ei	
Alimagnetointisuojaus	Underexcitation protection (loss-of-field)	$1/xd$	40	X	X	X
Vinokuormitussuojaus	Negative-sequence protection	$I_2>, t=f(I_2)$	46	X	X	X
Katkaisijavikasuojaus	Breaker failure protection	$I_{min}>$	50BF	X	X	
Moottorin käynnistysajan valvonta	Motor starting time supervision	$I_{start}2t$	48	ei	ei	
Moottorin käynnistysksen esto / Roottorin ylikuormitussuojaus	Restart inhibit for motors / Rotor overload protection	$I2t$	66,49 Rotor	Tehdään magnetointimuuntajan kojeistossa		X
Roottorin maasulkusuojaus (fn, R-mittaus)	Rotor earth-fault protection (fn, R-measuring)	$R<$	64R (fn)	ei	ei	X
Tahaton verkkoon kytkentä -suojaus	Inadvertent energization protection	$I>, V<$	50/27	X	X	
100% Staattorin maasulkusuojaus (3:s harmoninen, 150Hz)	100% Stator earth-fault protection with 3rd harmonics	$V_{0(3rd\ harm)}$	59TN, 27TN 3rd h	ei	ei	X
Impedanssisuojaus	Impedance protection with ($I>+V<$) pickup	$Z<$	21	X	X	X
Kierrossulkusuojaus	Interturn protection	$U_{Intertum}>$	59N (IT)	Riippuu käämityksen rakenteesta tarvitaanko		
Tasajännite / tasavirtasuojaus	DC Voltage / DC current time protection	$V_{dc}> I_{dc}>$	59N (DC) 51N (DC)	käynnistyskonverterin maasulkusuojaus	ei	X
Käynnistysksen aikainen ylivirtasuojaus	Overcurrent protection during startup (for gas turbines)	$I>$	51	X	X	
Maasulkuerovirtasuojaus	Earth-current differential protection	ΔI_e	87GN/TN	ei	ei	
Epätahtisuojaus	Out-of-step protection	$\Delta Z/\Delta t$	78	X	X	
Roottorin maasulkusuojaus (1-3Hz kanttiaaltojännite)	Rotor earth-fault protection (1-3Hz square wave voltage)	$R_{REF}<$	64R (1-3 Hz)	ei	X	
100% Staattorin maasulkusuojaus (20Hz jännite)	100% Stator earth-fault protection with 20Hz voltage	$R_{SEF}<$	64G (100%)	X	ei	
Taajuuden muutosnopeussuojaus	Rate-of-frequency-change protection	$df/dt >$	81R	X	X	
Jännitteen kulmavalvonta	Vector jump supervision (voltage)	$\Delta \phi >$		ei	ei	
Kynnysarvon valvonta	Threshold supervision			ei	ei	
Kiertosuunnan valvonta	Supervision of phase rotation	A, B, C	47	ei	ei	
Alivirta	Undercurrent via CFC	$I <$	37	ei	ei	
Ulkoinen lämpötilan valvonta sarjaportin kautta	External temperature monitoring via serial interface	v (Thermo-box)	38	ei	ei	

LIITE J Valitut laitteet ja niiden sijoitus

Generaattorisuojauskaappi

Kaappi + kalustus 7UM6221-5EB92-0CG0+L0S 7UM6221-5EB92-0CG0+L0S	Pääsuoja Varasuoja
7PA2732-0AA00-2	Laukaisureleet (4 apukosketinta)
7PA3032-1AA00-2 7PA3032-1AA00-2	Laukaisupiirin valvonta generaattorikatkaisijalle, laukaisupiiri 1 Laukaisupiirin valvonta generaattorikatkaisijalle, laukaisupiiri 2
7PA3032-1AA00-2 7PA3032-1AA00-2	Laukaisupiirin valvonta magnetoinnin katkaisijalle, laukaisupiiri 1 Laukaisupiirin valvonta magnetoinnin katkaisijalle, laukaisupiiri 2
7XV5653-0BA00	Kuitumuunnin verkkokatkaisijan laukaisua varten, pääyhteys
7XV5653-0BA00	Kuitumuunnin verkkokatkaisijan laukaisua varten, varayhteys
7KG61311MK24	Vahvistin DC-jännitesuojausta varten, käynnistyskonverterin maasulkusuojaus, pääsuojassa

Erillinen kotelo, kytketään roottoriin (magnetointiin) 1..3Hz:n syöttölaitteet roottorin 100% maasulkusuojausta varten

7XT7100-0BA00 7XR6004-0BA00	taajuusgeneraattori 2x40kohm
--------------------------------	---------------------------------

Tähtipistemuuntajan kaappi (tai erillinen kotelo)

7XT3300-0BA00 7XT3400-0BA00	20Hz:n syöttölaitteet staattorin 100% maasulkusuojausta varten taajuusgeneraattori kaistanpäästösuodin
--------------------------------	--

Muuntajasuojauskaappi

7UT6135-5EB92-1AA0+L0S	3-haarainen muuntajadifferentiaalisuoja, sis.ylivirtasuojan ja suunnatun maasulkusuojaus (konekiskon maasulkusuojaus), pääsuoja
7UT6135-5EB92-1AA0+L0S	3-haarainen muuntajadifferentiaalisuoja, sis.ylivirtasuojan ja suunnatun maasulkusuojaus (konekiskon maasulkusuojaus), varasuoja
7PA2732-0AA00-2	Laukaisureleet (4 apukosketinta)
Omakäyttömuuntajan jännitteensäätäjä	

Sähköasema ja verkkokatkaisija

7XV5653-0BA00 7XV5653-0BA00	Kuitumuunnin verkkokatkaisijan laukaisua varten, pääyhteys Kuitumuunnin verkkokatkaisijan laukaisua varten, varayhteys
7PA3032-1AA00-2 7PA3032-1AA00-2	Laukaisupiirin valvonta, laukaisupiiri 1 Laukaisupiirin valvonta, laukaisupiiri 2

LIITE K Uusien suojaustoimintojen kuvaus

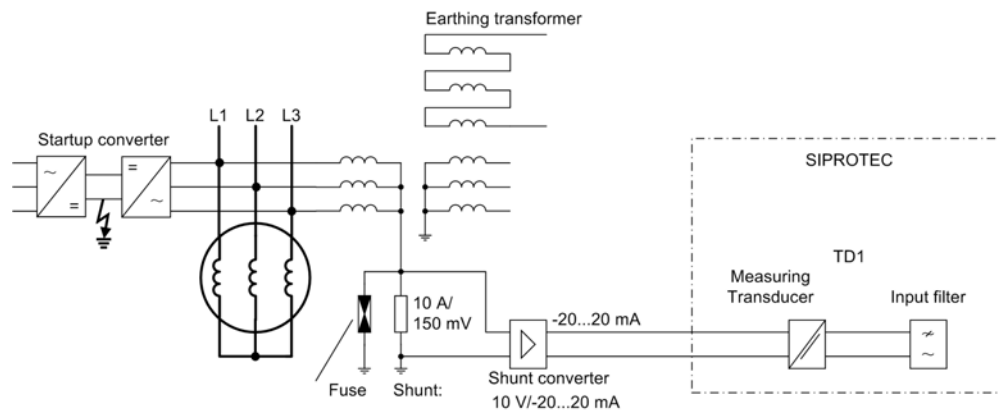
K.1 Tasajännitesuojaus (ANSI 59NDC/51NDC)

Havaitakseen tasajännitteitä, tasavirtoja ja pieniä vaihtosähköarvoja, 7UM62 on varustettu mittamuunnintulolla (TD1), jota voidaan käyttää joko jännitteiden ($\pm 10\text{V}$) tai virtojen ($\pm 20\text{mA}$), havaitsemiseen. Suuremmat tasajännitteet kytketään erillisen jännitteenjakajan kautta. Tasajännite/tasavirta -suojausta voidaan käyttää esimerkiksi valvomaan magnetointijännitettä tahtikoneissa tai havaitsemaan maasulut kaasuturbiinin käynnistyskonvertterin tasasähköpuolella. [18]

Käynnistyskonvertterin maasulkusuojaus

Mikäli maasulku esiintyy käynnistyskonvertteripiirissä, virta kulkee järjestelmän kaikkien maadoitettujen osien läpi, koska kyseessä on tasajännite. Koska maadoitus- ja tähtipistemuuntajilla on pienempiohminen resistanssi kuin jännitemuuntajilla, terminen kuormitus (lämpörasitus) on niillä suurin. [18]

Tasavirta muunnetaan jännitteeksi shuntilla ja syötetään shunttikonvertterin avulla suojausalueen mittaustuloon. Shunttikonvertteri voi olla mittamuunnin kuten 7KG6131. Mikäli shunttikonvertterin ja suojausalueen välinen matka on lyhyt, voidaan käyttää jännitemittaustuloa. Pidemmällä matkoilla käytetään virtamittaustuloa ($-20\dots 20\text{ mA}$ tai $4\dots 20\text{ mA}$). [18]



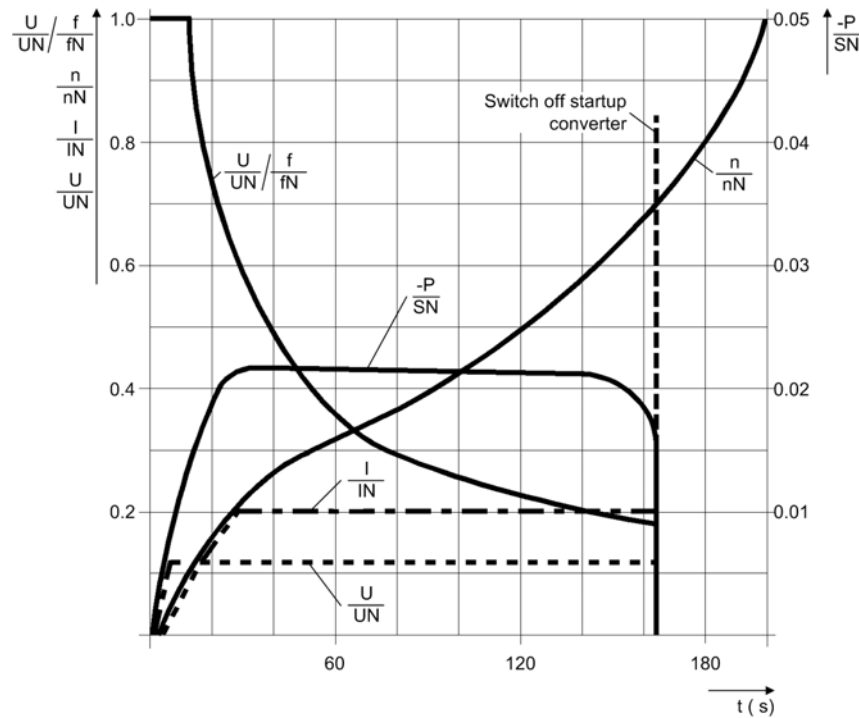
Kuva K1 Tasajännitesuojaus käynnistyskonvertterin maasulkusuojausena

K.2 Ylivirtasuojauksen käynnistysajan aikana (ANSI 51)

Kaasuturbiinit voidaan käynnistää käynnistysmuuttajan avulla. Muuttaja syöttää virtaa generaattoriin kehittäen asteittain kasvavalla taajuudella pyörivän kentän. Tämä aiheuttaa roottorin pyörimisen joka edelleen käyttää turbiinia. Turbiinin polttokammioihin johdetaan polttoaine, joka sytytetään n.70%:n nopeudella ja sitä

kiihdytetään kunnes se saavuttaa täyden nopeutensa, jolloin käynnistysmuuttaja sammutetaan.

Oheinen kuvaaja kuvassa 1 osoittaa ominaisuuksia käynnistyksen aikana. Huomioitavaa on, että kaikki arvot on normalisoitu nimellisarvoihin. Olettaen, että oikosulku saattaa esiintyä generaattorissa käynnistyksen aikana, oikosulkusuojaus on tarpeellinen koko taajuusalueella. [18]



Kuva K2 Ominaisarvot kaasuturbiinin käynnistyksen aikana
(SN = 150 MVA; UN = 10.5 kV; PKäynnistyskonvertteri = 2.9 MW)

Näytteenottotaajuuden automaattinen sovitus generaattorin kulloiseenkin taajuuteen tarjoaa merkittäviä etuja, koska tällöin herkkyys säilyy samana koko taajuusalueella. Tämä sovitus alkaa siirryttäessä 10Hz:stä 11Hz:iin. Tuloksena kaikki oikosulkusuojaustoiminnot, kuten ylivirtasuojaus, impedanssisuojaus ja differentiaalisuojaus toimivat samalla herkkyydellä kuin nimellistaajuudellakin. [18]

Käynnistysylivirtasuojaus on oikosulkusuojaustoiminto, joka toimii alle 10Hz:n taajuudella. Sen toiminta-alue on suunniteltu 2Hz...n.10Hz. Tämän alueen ulkopuolella muut oikosulkusuojaustoiminnot ovat aktiivisia. Toiminta on aktiivinen myös yli 70Hz taajuudella, mutta rajatulla herkkyydellä, koska tämä taajuus on toiminta-alueen ulkopuolella. [18]

K.3 Tahaton verkkoon kytkentä [engl. Inadvertent energization] (ANSI 50, 27)

Suoja rajoittaa vaurioita vahingossa verkkoon kytketyssä seisovassa tai käynnistetyssä, mutta ei vielä tahdistetussa generaattorissa nopealla pääkatkaisijan ohjauksella.

Seisovan generaattorin verkkoon kytkentä vastaa induktanssin kytkentää. Verkon nimellisjännitteen vaikutuksen vuoksi generaattori käynnistyy suurella jättämällä epätahtikoneena. Tässä tapauksessa suuret virrat indusoituvat roottoriin ja saattavat tuhota sen.

Suojaus toimii ainoastaan, jos mitatut suureet eivät vielä ole saavuttaneet käyttötaajuusaluetta tai jos alijännitettä esiintyy alitaajuusalueella (generaattori käynnistetty, mutta ei vielä tahdistettu)

Suojaus lukittuu jännitteen saavuttaessa sallitun minimijännitteen, jotta estetään havahtuminen normaalikäytön aikana. Lukitus on viivästetty, jotta suoja ei lukittuisi välittömästi virheellisen verkkoon kytkennän jälkeen. Havahtumisviive on tarpeellinen, jotta suoja ei toimisi suurivirtaisten oikosulkujen aikana niiden aiheuttaessa voimakkaan jännitteenaleneman.

Koska suojauksen täytyy toimia erittäin nopeasti, hetkellisiä virta-arvoja mitataan laajalla taajuusalueella jo suojan ollessa normaalitilassa. Jos sopivia mitta-arvoja havaitaan, myötäjärjestelmän jännite, suojauksen lukitustaajuus ja hetkelliset virta-arvot toimivat laukaisukriteereinä.

Suoja voidaan lukita binäärisen tulon kautta esim. jännitemuuntajan suojakytkimen lauetessa.

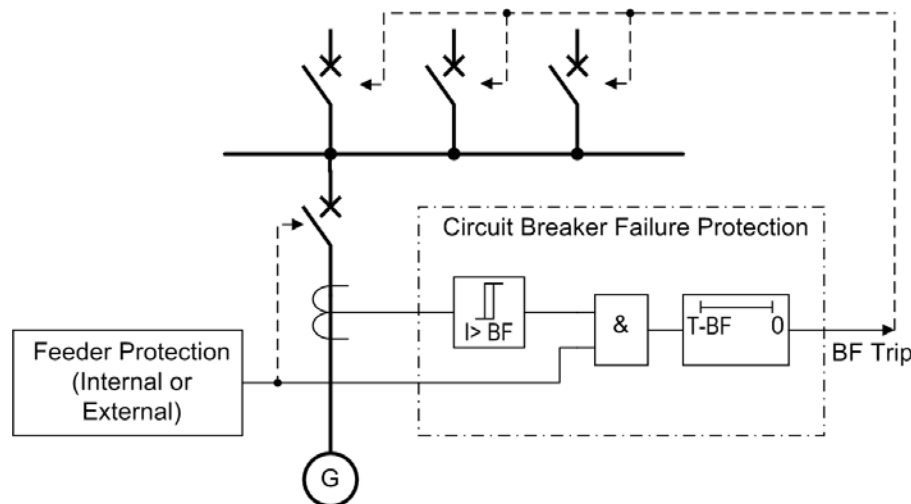
K.4 Katkaisijavikasuoja (ANSI 50BF)

Katkaisijavikasuoja toimii nopeana varaportana tilanteessa, jossa jonkin suojan laukaisu ei saa paikallista katkaisijaa auki. Generaattorisuojauksessa tämä on tyypillisesti generaattorikatkaisija.

Jos esim. oikosulkusuoja välittää laukaisuohjauksen katkaisijalle, liitetään tämä sama tieto samanaikaisesti myös katkaisijavikasuojuille kuvan K3 mukaisesti. Tällöin käynnistyy T–BF aikaporras. Aikaporras on käynnissä niin kauan aikaa, kun suojan laukaisuohjaus on voimassa ja katkaisijan läpi kulkee virtaa. Häiriöttömässä tilanteessa katkaisija saa vikavirran katkeamaan ja virran kulku keskeytyy. Virtaraja-arvoporras palautuu erittäin nopeasti (noin 10 ms) ja pysäyttää T–BF aikaviiveen.

Jos suojan laukaisuohjausta ei toteuteta eli katkaisija on vikaantunut, kulkee virta edelleen ja aikaporras kuluu umpeen. Tämän jälkeen katkaisijavikasuoja muodostaa laukaisuohjauksen, jonka avulla voidaan laukaista ympäröivät katkaisijat jotta ne

katkaisisivat vikavirran kulun. Lähtösuojan palautumisajalla ei ole merkitystä, koska katkaisijavikasuojan virtavalvonta toimii itsenäisesti virran katkeamista valvoen. [18]



Kuva K3 Katkaisijavikasuojan toimintaperiaate [18]

K.5 Taajuuden muutosnopeussuojaus df/dt [engl. rate-of-frequency-change protection] (ANSI 81R)

Taajuudenmuutosnopeussuojalla taajuuden muutokset voidaan havaita nopeasti. Tämä mahdollistaa pikaisen reagoinnin taajuuskuoppiin tai taajuuden nousuun. Laukaisukäsky voidaan antaa jo ennen kuin normaalin taajuussuojan havahtumisraja on saavutettu.

Taajuusmuutokset johtuvat esimerkiksi tuotetun ja kulutetun pätötehon epätasapainosta. Ne vaativat toisaalta ohjaustoimenpiteitä ja toisaalta kytkentätoimenpiteitä. Nämä voivat olla keventäviä toimenpiteitä kuten verkon irtikytkentä tai kuormien poiskytkentä [engl. load shedding]. Mitä nopeammin häiriön ilmaantumisen jälkeen nämä toimenpiteet suoritetaan, sitä tehokkaampia ne ovat. Kaksi pääsovellusta tälle suojaukselle ovat siis verkon irtikytkentä ja kuormien pudotus. [18]

Mittausperiaate

Taajuus määritetään myötäjärjestelmän jännitteistä kerran jaksossa kolmen jakson pituisen mittausikkunan aikana ja kahden peräkkäisen taajuusmittauksen keskiarvo muodostetaan. Taajuusero määritetään aseteltavin aikavälein (oletusasetuksena 5 jaksoa). Taajuuseron ja aikaeron suhde vastaa taajuuden muutosta; se voi olla positiivinen tai negatiivinen. Mittaus suoritetaan jatkuvasti. Valvontatoiminnot kuten alijännitevalvonta, tarkistaa vaihekulmahyppäykset jne. jotta vältetään ylitoiminta. [18]

Taajuuden nousu tai lasku

Taajuuden muutosnopeussuojassa on neljä porrasta, $df1/dt \dots df4/dt$. Tämä mahdollistaa toiminnon mukauttamisen kaikkiin verkon tilanteisiin. Portaat voidaan asetella havaitsemaan joko taajuuden lasku ($-df/dt$) tai taajuuden nousu ($+df/dt$). Taajuuslaskuporras on aktiivinen ainoastaan nimellistaajuuden alittavilla arvoilla. Samoin taajuuden nousuporras on aktiivinen ainoastaan nimellistaajuuden ylittävillä arvoilla. Asetteluarvoilla määritellään mihin tarkoitukseen mitäkin porrasta käytetään. Jotta vältettäisiin asetteluparametrien määrän lisääntyminen, aseteltavat mittausikkunat taajuuseron muodostamiseen ja päästöarvon määrittelylle ovat kaikki käytössä kahdelle portaalte. [18]

Toiminta-alue

Taajuus voidaan määritellä niin kauan kun riittävän voimakkaat myötäjärjestelmän jännitteet ovat mitattavissa. Jos mittausjännite putoaa alle aseteltavan minimiarvon, taajuussuojaus on poissa käytöstä, koska tarkkoja taajuusarvoja ei voida laskea. Kaikki neljä taajuusporrasta voidaan lukita erikseen ulkoisella tulolla. Alijännitelukitus on käytössä kaikissa portaissa samanaikaisesti. [18]